

文章编号:1673-2049(2017)01-0015-10

基于 SPSS 回归分析的锂渣混凝土抗压强度预测模型

许开成^{1,2}, 毕丽苹¹, 陈梦成^{1,2}

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013;

2. 华东交通大学 江西省建筑过程模拟与控制重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要:利用 SPSS 软件的逐步回归分析法、多元非线性回归法建立锂渣混凝土的强度预测模型, 分析各模型的残差图、预测值与试验值的对比, 并结合均方根误差、平均绝对误差、平均绝对百分比误差和模型可决系数值对各模型的精确度等进行综合评价, 最终确定出较优的锂渣混凝土强度预测模型。结果表明:水胶比、锂渣掺量和减水剂掺量对锂渣混凝土强度的影响十分显著;经残差分析和 95% 预测值区间检验, 5 个建议模型都有较好的精确度;经综合评价建议最佳的锂渣混凝土强度预测模型是以水泥强度、胶水比、锂渣掺量和减水剂掺量为自变量的非线性回归方程, 其相应的可决系数 $R^2=0.920$, 均方根误差为 3.684, 平均绝对误差为 3.15, 平均绝对百分比误差为 5.44。

关键词:SPSS; 逐步回归分析法; 非线性回归; 锂渣混凝土; 抗压强度; 残差分析

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Prediction Model of Compressive Strength of Lithium Slag Concrete Based on SPSS Regression Analysis

XU Kai-cheng^{1,2}, BI Li-ping¹, CHEN Meng-cheng^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Simulation and Control for Construction Course, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: The strength prediction model of lithium slag concrete was established by the stepwise regression method and multiple nonlinear regression analysis method in SPSS software. Then the residual plots and comparison between predicted and experimental values of the proposed models were analyzed. Combined with root mean square error, mean absolute error, mean absolute percentage error and model determination coefficient value, the accuracy of the proposed model was evaluated synthetically, and the better strength prediction model of lithium slag concrete was determined. The results show that the effects of water-binder ratio, the amount of lithium slag and water reducing agent on the strength of lithium slag concrete are very significant. By the residual analysis and 95% predictive value interval test, the 5 proposed models have good accuracy. Based on the comprehensive evaluation, it is recommended that the best strength prediction model of lithium slag concrete is a nonlinear regression equation with the strength of cement, the binder-water ratio, the amount of lithium slag and water reducing agent as the independent variable, and its corresponding performance measurement values include that determination coefficient R^2 is 0.920, root mean square error is 3.684, mean absolute error is

收稿日期:2016-07-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51468017, 51378206);江西省自然科学基金项目(20133BCB24008, 20143ACB20008)

作者简介:许开成(1973-),男,安徽东至人,教授,工学博士, E-mail:505958373@qq.com。

3.15, mean absolute percentage error is 5.44.

Key words: SPSS; stepwise regression analysis; nonlinear regression; lithium slag concrete; compressive strength; residual analysis

0 引言

锂渣是一种工业废渣,含有大量的无定形二氧化硅,与矿渣、硅灰等矿物掺和料具有相同的特点,因此锂渣混凝土引起了大量学者的关注和重视。目前锂渣混凝土的研究主要集中于混凝土基本力学性能及抗裂性能等方面,在混凝土强度预测方面研究尚少。建立混凝土强度预测模型是十分必要的,不仅可以为锂渣混凝土配合比设计提供参考,还能提前推定混凝土强度,为后期施工安排提供帮助。通常混凝土强度预测模型采用线性回归分析法,但现代混凝土的成分复杂,影响混凝土抗压强度的因素也较复杂,所以简单的线性回归分析方法不再适用于预测现代混凝土的抗压强度模型。目前,已有学者在混凝土强度预测模型方面进行了研究,如 Popovics^[1]提出粉煤灰混凝土强度的关系式,杨钱荣等^[2]提出粉煤灰混凝土的双变量强度公式,Garcia等^[3]建立三次回归模型分析粉煤灰和硅灰对混凝土早期抗压强度的影响,Hacene等^[4]利用神经网络和响应曲面法建立混凝土抗压强度预测模型,Peng等^[5]利用遗传运算树、非线性回归法和神经网络法建立高性能混凝土不同龄期的强度模型,王文斌^[6]进行了粉煤灰的活性激发与大掺量粉煤灰混凝土的试验研究,利用 SPSS 统计分析软件建立了粉煤灰混凝土不同龄期的抗压强度回归方程。混凝土强度预测模型多为非线性形式,预测方法有 SPSS 回归分析法、神经网络预测法、遗传运算树等。神经网络预测法精确度高,但不能形成明确的方程;遗传运算树能构建出强度模型,但编程复杂;SPSS 回归分析法操作简单,能建立出明确的强度模型,准确度高,能对各回归系数及整个回归方程分别进行显著性检验,能避免变量的增加对方程判定系数的影响,所以它适合建立混凝土强度预测模型。基于此,本文以现有混凝土强度模型为参考,利用 SPSS 逐步回归分析法和非线性回归法建立锂渣混凝土抗压强度的预测模型;模型形式为多元线性和非线性,通过对比各模型确定锂渣混凝土抗压强度的最佳预测模型。

1 SPSS 逐步回归分析法和非线性回归法

1.1 SPSS 逐步回归分析法

逐步回归分析法^[7]是线性回归中决定备选自变

量取舍的一种回归分析方法,可以依据标准自动选取自变量,不仅可以避免遗漏某些重要的自变量,也可以避免进入某些不重要的自变量,确定出影响因变量的重要因素,更快捷地建立模型。该法要经过多次迭代才能完成,备选自变量越多,所需要的迭代步骤就会越多,必须借助统计软件才能有效完成。

1.2 非线性回归法

SPSS 的非线性回归有 2 种,一种是采用广义线性回归法建立非线性回归模型,另一种是直接输入预先确定的模型形式进行非线性回归。广义线性回归法如下:

设狭义的线性回归模型^[7]为

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_p X_p + \epsilon \quad (1)$$

推广的线性回归模型为

$$Y = \beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2 + \cdots + \beta_q Z_q + \epsilon \quad (2)$$

式中: Y 为因变量; X_1, X_2, \cdots, X_p ($p \geq 1$) 均为式(1)模型的自变量; Z_1, Z_2, \cdots, Z_q ($q \geq 1$) 均为式(2)模型的自变量; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_p$ (β_q) 均为自变量参数; ϵ 为残差。

式(2)中,每自变量 Z_1, Z_2, \cdots, Z_q 都是初始自变量 X_1, X_2, \cdots, X_p 的函数,譬如: $Z_1 = X_1^2, Z_2 = X_2^3, Z_3 = \lg(X_3), Z_4 = X_2 X_3$ 等。这种函数关系的最简单形式为 $Z_1 = X_1, Z_2 = X_2, \cdots, Z_q = X_p$, 此时,推广的线性回归模型就还原为狭义的线性模型。

广义线性回归法将非线性模型线性化,该线性化模型可以直接进行线性回归分析,从而可以利用逐步回归分析方法决定应取舍的自变量,进而回归出满足要求的非线性预测模型。

2 建立模型

2.1 试验数据

本文依据笔者课题组的锂渣混凝土课题试验研究资料,结合有关锂渣混凝土的文献资料,提取出锂渣混凝土强度和配比的有效数据。锂渣混凝土强度模型的输入变量设为水泥的强度、胶水比、水的用量、水泥用量、锂渣掺量、砂率、锂渣的细度(比表面积)、减水剂的掺量、胶水比的 n 次方、锂渣掺量的 n 次方和减水剂掺量的 n 次方($n=2, 3, 4$; n 值越大,回归方程拟合优度越差),输出变量设为锂渣混凝土 28 d 抗压强度。数据参数见表 1。

表 1 数据参数
Tab.1 Parameters of Data

| 序号 | 水泥类型 | 数据 个数 | 水胶比 | 胶水比 | 锂渣掺 量/% | 锂渣比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹) | 减水剂 掺量/% | 锂渣 产地 | 混凝土 28 d 抗压 强度/MPa | 数据来源 |
|----|--------------------------|----------|-----------|-----------|------------|--|-------------|------------|-----------------------|-------------|
| 1 | P. O42.5, | 101 | 0.25~0.53 | 1.89~4.00 | 5~70 | 320~1 280 | 0.00~4.00 | 新疆, 四川, | 34.7~99.0 | 文献[8]~[24] |
| 2 | P. O42.5R | 37 | 0.27~0.42 | 2.38~3.70 | 15~60 | 400~1 280 | 0.47~1.50 | | 37.0~86.0 | 文献[25]~[26] |
| 3 | P. II 52.5, P. O52.5R | 69 | 0.23~0.34 | 2.94~4.35 | 5~40 | 320~1 512 | 0.80~1.75 | 江西 | 64.5~126.0 | 文献[27]~[36] |

注:掺量为质量分数。

锂渣属于一种新型矿物掺和料,目前针对锂渣混凝土的研究还较少,所以所收集到的锂渣混凝土配比数据较少,但该数据量已基本满足模型预测的要求。由表 1 可知,52.5 级水泥类型的数据较少,其中水胶比主要在 0.26 左右,很大部分都小于 0.3,并且锂渣掺量主要为 15%和 20%,掺量分布过于集中。经回归分析发现,现有 52.5 级水泥类型的锂渣混凝土数据无法形成准确的回归模型,所以收集的 52.5 级水泥类型的数据不具有代表性。因此,本文锂渣混凝土强度预测模型仅适用于使用 42.5 级普通硅酸盐水泥的锂渣混凝土。

表 1 中 42.5 级普通硅酸盐水泥类型的数据是建模使用的所有数据,从中随机抽选约 74%(101 个数据)的数据作为训练集用于回归拟合,约 26%(37 个)的数据作为测试集用于验证模型,检验其普适性。

2.2 数据排异准则与评价模型方法

2.2.1 数据排异准则

异常值是数据集中过大或过小的观测值,异常值的存在对于回归分析的结果有很大影响,所以在实际问题中首要做的就是检测数据中的异常值。异常值的检测方法^[7]可以从标准化残差、学生化删除残差、高杠杆率点、库克距离这几方面同时着手,其中标准化残差或学生化删除残差的精确度高,是最基本的排异方法。各排异指标均可由 SPSS 直接计算得出。本文首先将表 1 中数据进行异常值检测,将其排除后再进行模型预测。

2.2.2 评价模型方法

本文模型由 SPSS 软件完成,SPSS 软件是利用最小平方方法得到估计的回归方程。本文从 3 个方面评价模型的拟合优度:①通过分析各模型残差图、预测值与实际试验值的趋势对比图进行评价^[37-39];②采用相对误差和预测误差的评价指标,即均方根误差 E_{RMS} 、平均绝对误差 E_{MA} 和平均绝对百分比误差 E_{MAP} 评价模型^[5,40],而各评价指标均能很好地反映出预测模型的精确度,各值越小说明预测值与实际

试验值差别越小,模型越精确;③采用可决系数 R^2 评价模型对样本数据拟合效果的优劣。

各评价指标的计算式如下

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2}$$
$$E_{\text{MA}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j - \hat{y}_j|$$
$$E_{\text{MAP}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{y_j - \hat{y}_j}{y_j} \right| \times 100\%$$

式中: y_j 为抗压强度实际值(本文为锂渣混凝土 28 d 抗压强度实测值); \hat{y}_j 为抗压强度预测值(本文为锂渣混凝土 28 d 抗压强度预测值); n 为样本总量。

2.3 建议模型

依据第 2.1 节所述自变量、因变量信息和表 1 数据,笔者经过不同组合建立预测模型,发现胶水比、锂渣掺量和减水剂掺量对锂渣混凝土强度的影响显著,故经过多次对比,初步确定以下模型类型。

模型 1: $y=a_0+a_1 \frac{B}{W}+a_2 \omega_{li}+a_3 \omega_j$

模型 2: $y=b_0+b_1 \frac{B}{W}+b_2 \omega_{li}^2+b_3 \omega_j$

模型 3: $y=c_0+c_1 (\frac{B}{W})^2+c_2 \omega_{li}+c_3 \omega_j$

模型 4: $y=d_0+d_1 (\frac{B}{W})^2+d_2 \omega_{li}^2+d_3 \omega_j$

模型 5: $y=a f_b (\frac{B}{W}+b)+c \omega_{li}+d \omega_j+e$

式中: y 为锂渣混凝土 28 d 抗压强度预测值; $\frac{B}{W}$ 为胶水比; ω_{li} 为锂渣掺量; ω_j 为减水剂掺量; f_b 为水泥 28 d 抗压强度; $a_i, b_i, c_i, d_i (i=0,1,2,3)$ 和 a, b, c, d, e 均为模型变量参数,其值为常数。

3 结果与分析

3.1 各模型结果与分析

3.1.1 模型 1 结果

经 SPSS 统计软件回归,模型 1 的数学表达式

如下

$$y=7.643+19.648\frac{B}{W}-0.432\omega_{li}+5.251\omega_j\Bigg\} \quad (3)$$
$$R^2=0.907$$

图 1 为锂渣混凝土 28 d 抗压强度预测模型 1 的残差图。观察残差图发现,残差随机地散落在 0 值周围,未呈现出某种规律或变化趋势等现象。可见,模型 1 是可用于预测混凝土抗压强度的。此外,经分析测试集的残差分布,得到预测值的相对误差最高约为 15%,在可接受范围内。

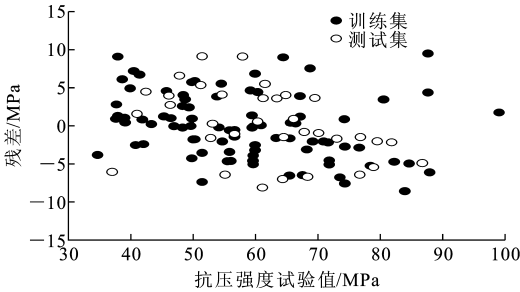


图 1 模型 1 残差图
Fig. 1 Residual Plots of Model 1

利用模型 1 方程分别对训练集和测试集的数据进行拟合,将得到的各数据集抗压强度预测值与相应的试验值进行对比,训练集和测试集的抗压强度预测值与试验值散点图如图 2 所示。由图 2 可知,不论训练集还是测试集,数据均分布在一条斜直线附近,直线的斜率约接近于 1,即预测值能较准确地估计试验值。

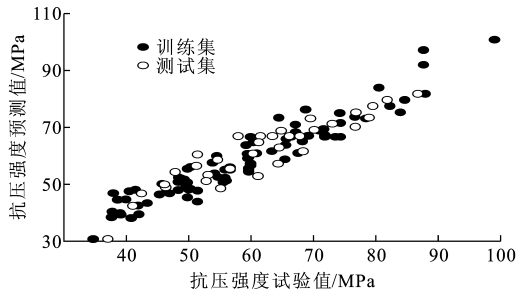


图 2 模型 1 抗压强度预测值与试验值散点图
Fig. 2 Scatter Plots of Predictive Values and Experimental Values of Model 1

图 3 为模型 1 的训练集抗压强度预测值与试验值对比;图 4 为模型 1 的测试集抗压强度预测值与试验值对比。图 3,4 的虚线均为 95% 预测值区间的上下限,即期望的实际响应范围。图 3 中,拟合曲线的斜率为 1,可决系数较大, $R^2=0.909$;图 4 中,拟合曲线的斜率非常接近于 1,斜率 $K=1.0088$,且方程的可决系数也较大, $R^2=0.850$;此外,图 3,4

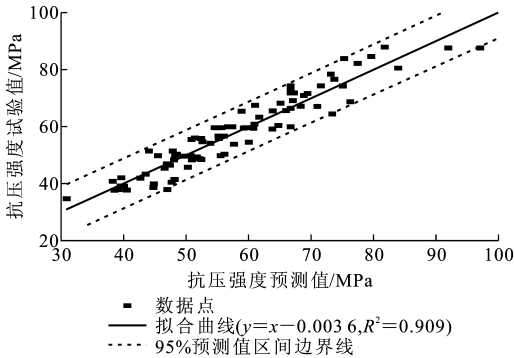


图 3 模型 1 的训练集抗压强度预测值与试验值对比
Fig. 3 Comparison Between Predictive Values and Experimental Values of Compressive Strengths in Training Set of Model 1

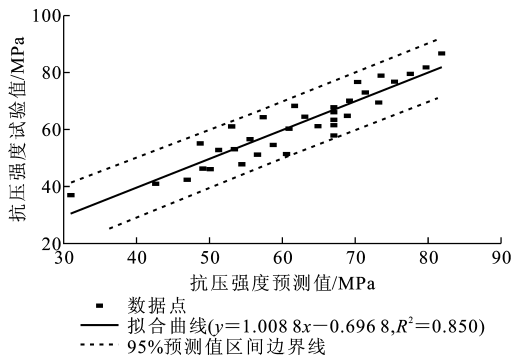


图 4 模型 1 的测试集抗压强度预测值与试验值对比
Fig. 4 Comparison Between Predictive Values and Experimental Values of Compressive Strengths in Test Set of Model 1

中大多数的点聚集在拟合曲线附近,落在 95% 预测值区间内。可见,模型 1 的精确度高。

3.1.2 模型 2 结果

模型 2 的数学表达式如下

$$y=-1.249+20.33\frac{B}{W}-0.006\omega_{li}^2+\Bigg\} \quad (4)$$
$$5.148\omega_j$$
$$R^2=0.901$$

图 5 为模型 2 的残差图。同模型 1 残差图一样,残差随机聚集在 0 值周围;观察发现,训练集和测试集有类似的特点。经测试集的残差分析,预测值的相对误差最大约 15%,在可接受范围内。因此,模型 2 可用于预测混凝土抗压强度。

模型 2 的抗压强度预测值与试验值关系如图 6~8 所示。图 6 散点图趋势与模型 1 散点图相似,斜直线趋势明显。图 7 为模型 2 的训练集抗压强度预测值与试验值对比,其中拟合曲线的斜率为 0.988 3, $R^2=0.903$,并且所有数据都落在 95% 预

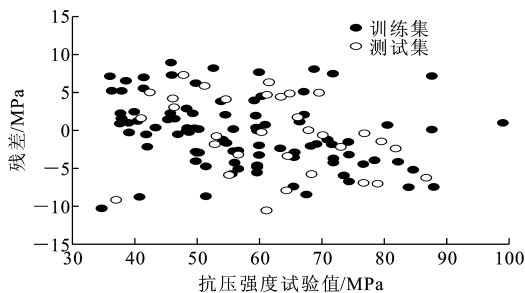


图 5 模型 2 残差图

Fig. 5 Residual Plots of Model 2

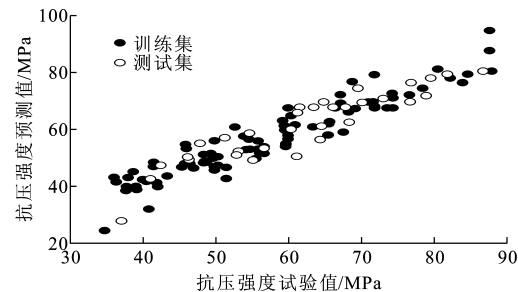


图 6 模型 2 抗压强度预测值与试验值散点图

Fig. 6 Scatter Plots of Predictive Values and Experimental Values of Model 2

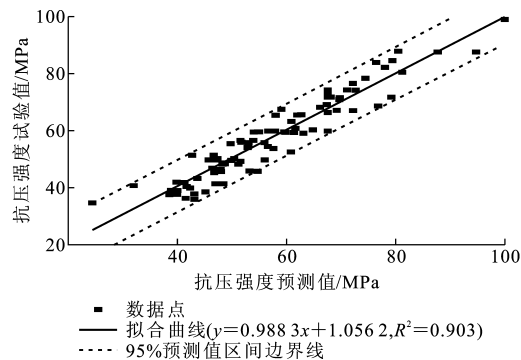


图 7 模型 2 的训练集抗压强度预测值与试验值对比

Fig. 7 Comparison Between Predictive Values and Experimental Values of Compressive Strengths in Training Set of Model 2

测值区间;图 8 为模型 2 的测试集抗压强度预测值与试验值对比,其中拟合曲线的斜率为 0.962 5, $R^2=0.838$,同时所有数据都落在 95%预测值区间。可见,模型 2 的精确度也较高。

3.1.3 模型 3 结果

模型 3 的数学表达式如下

$$\left. \begin{aligned} y &= 36.348 + 3.099 \left(\frac{B}{W} \right)^2 - 0.410 \omega_{li} + \\ &\quad 5.518 \omega_j \\ R^2 &= 0.884 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

图 9 为模型 3 的残差图。由图 9 可知,所有数

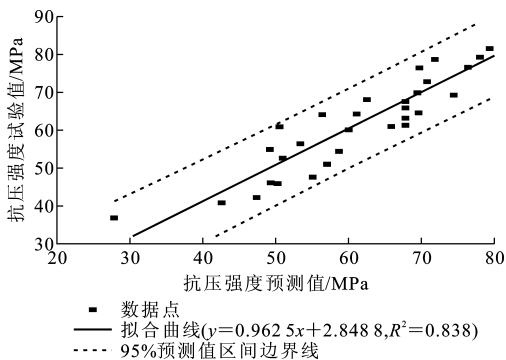


图 8 模型 2 的测试集抗压强度预测值与试验值对比

Fig. 8 Comparison Between Predictive Values and Experimental Values of Compressive Strengths in Test Set of Model 2

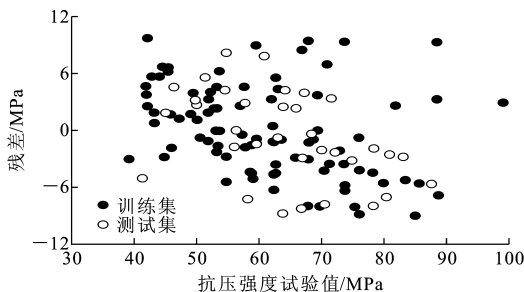


图 9 模型 3 残差图

Fig. 9 Residual Plots of Model 3

据的残差值均随机地散落在 0 值周围,但该模型残差分布程度比模型 1,2 稀疏。可见,虽然模型 3 能用于预测混凝土强度,但精度低于模型 1,2。经分析测试集的残差分布,发现测试集预测值的相对误差都小于 15%。

模型 3 抗压强度预测值与试验值散点图如图 10 所示。与模型 1,2 相同,不论是训练集还是测试集,模型 3 的抗压强度预测值与试验值均呈线性关系。图 11 为模型 3 的训练集抗压强度预测值与试验值对比。经拟合发现,两者线性关系较好,所有数据都落在 95%预测值区间,证明模型具有较好的精确度,但模型 3 的可决系数 $R^2=0.887$ 却明显低于模型 1,2 的 R^2 值,所以模型 3 的拟合优度低于模型 1,2。图 12 为模型 3 的测试集抗压强度预测值与试验值对比,该模型预测值与试验值也呈线性关系,可决系数 $R^2=0.849$,略大于模型 2 的 R^2 值,但与模型 1 的 R^2 值相当。因为训练集和测试集的数据都是相互独立且随机分配,所以训练集结果与测试集结果会有所差异。

3.1.4 模型 4 结果

模型 4 的数学表达式如下

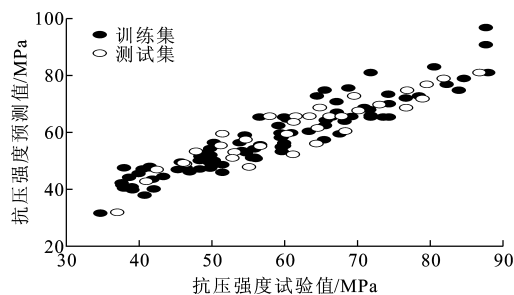


图 10 模型 3 抗压强度预测值与试验值散点图
Fig. 10 Scatter Plots of Predictive Values and Experimental Values of Model 3

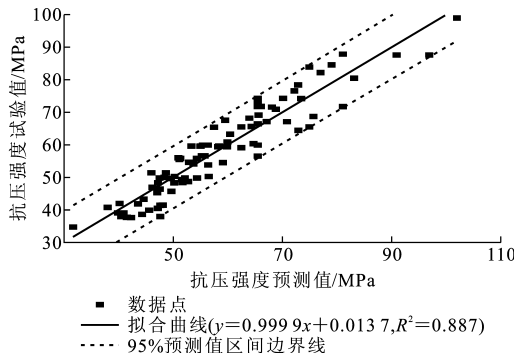


图 11 模型 3 的训练集抗压强度预测值与试验值对比
Fig. 11 Comparison Between Predictive Values and Experimental Values of Compressive Strengths in Training Set of Model 3

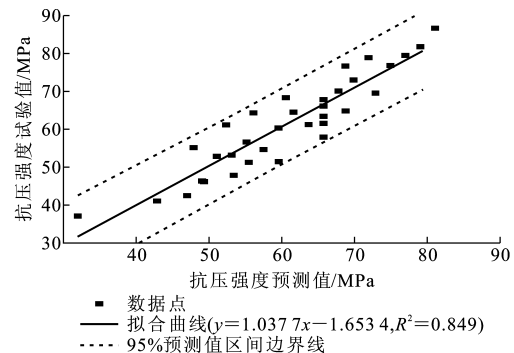


图 12 模型 3 的测试集抗压强度预测值与试验值对比
Fig. 12 Comparison Between Predictive Values and Experimental Values of Compressive Strengths in Test Set of Model 3

$$y=27.818+3.431\left(\frac{B}{W}\right)^2-0.006\omega_{li}^2+5.173\omega_j\left\{ \begin{array}{l} R^2=0.895 \end{array} \right. \quad (6)$$

图 13 为模型 4 的残差图。模型 4 的残差图与模型 3 残差图相似,残差值随机地散落在 0 值周围,残差绝对值小于 10,但残差分布较为稀疏。可见,模型 4 的精度低于模型 1,2,与模型 3 相当。经分析测试集残差分布,发现测试集预测值的相对误差

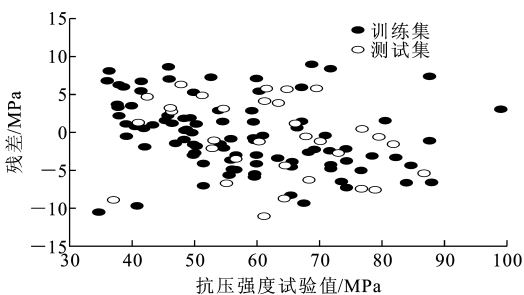


图 13 模型 4 残差图
Fig. 13 Residual Plots of Model 4

也小于 15%。模型 4 的抗压强度预测值与试验值关系见图 14~16。图 14 为模型 4 的抗压强度试验值与预测值散点图,其与模型 1~3 的散点图规律相同,说明模型 4 能较好地预测试验值。图 15,16 分别为模型 4 训练集和测试集的抗压强度预测值与试验值对比。图 15 中,拟合曲线的斜率为 0.985 7,可决系数 $R^2=0.896$;图 16 中,拟合曲线的斜率为 0.942 7, $R^2=0.841$ 。可见,模型 4 的拟合优度有所降低,不仅预测值与试验值的拟合曲线斜率小于 1, R^2 值也明显降低。因此,模型 4 的精度要低于模型 1~3。

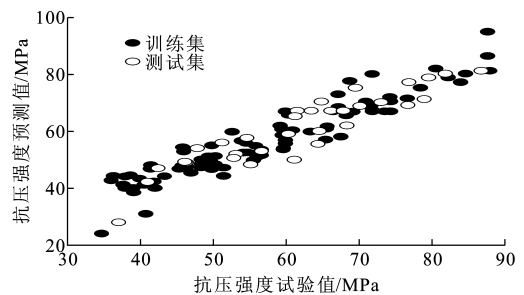


图 14 模型 4 抗压强度预测值与试验值散点图
Fig. 14 Scatter Plots of Predictive Values and Experimental Values of Model 4

3.1.5 模型 5 结果

模型 5 的数学表达式如下

$$\left. \begin{aligned} y &= 0.419f_b\left(\frac{B}{W}-1.032\right)-0.445\omega_{li}+ \\ &\quad 4.205\omega_j+26.548 \\ R^2 &= 0.920 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

图 17 为模型 5 的残差图。残差值随机分布在 0 值周围,且分布程度较为密集,残差值较小;残差绝对值中只有 1 个值接近于 10,其余均小于 8,并且模型 5 的相对残差值最高约为 15%。因此,模型 5 可用于预测锂渣混凝土强度,并且模型 5 的精度较高。

模型 5 的抗压强度预测值与试验值关系见图

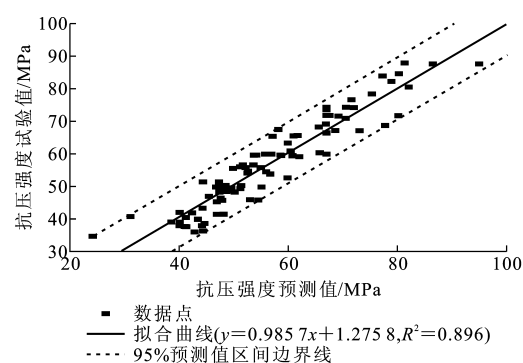


图 15 模型 4 的训练集抗压强度预测值与试验值对比

Fig. 15 Comparison Between Predictive Values and Experimental Values of Compressive Strengths in Training Set of Model 4

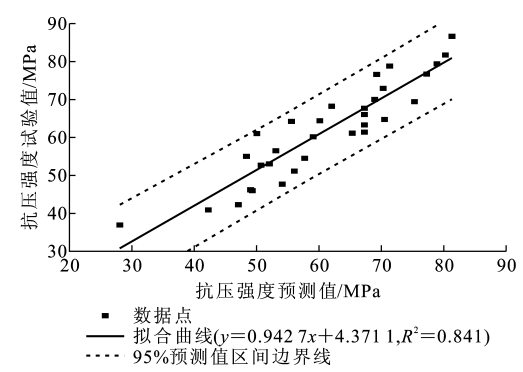


图 16 模型 4 的测试集抗压强度预测值与试验值对比

Fig. 16 Comparison Between Predictive Values and Experimental Values of Compressive Strengths in Test Set of Model 4

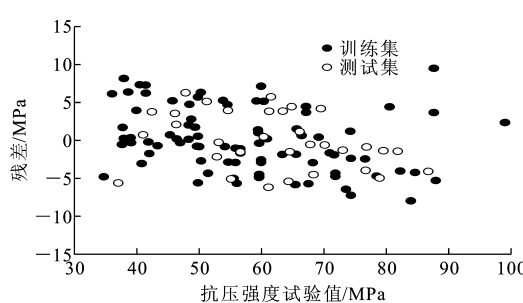


图 17 模型 5 残差图

Fig. 17 Residual Plots of Model 5

18~20。图 18 为模型 5 抗压强度预测值与试验值散点图,由图 18 可知,预测值与试验值呈现出线性增长趋势,与模型 1~4 的散点图规律相同,说明模型 5 能较好地预测试验值。图 19,20 分别为模型 5 的训练集和测试集抗压强度预测值与试验值对比。由图 19,20 可知,数据均落在 95% 预测值区间内,预测值与试验值的拟合曲线斜率几乎等于 1,截距接近于 0,并且拟合方程的可决系数 R^2 均大于 0.9。因此,模型 5 的精度高,并优于其他模型。

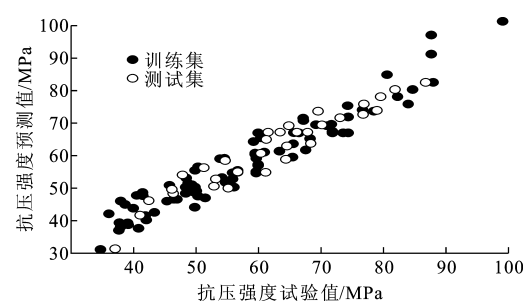


图 18 模型 5 抗压强度预测值与试验值散点图

Fig. 18 Scatter Plots of Predictive Values and Experimental Values of Model 5

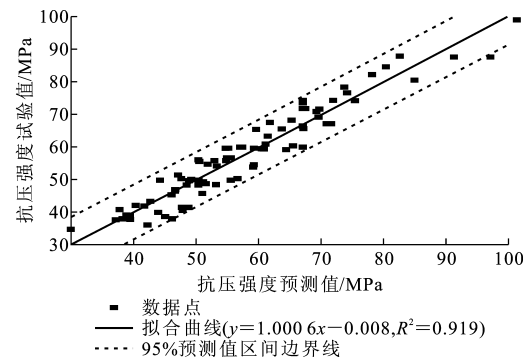


图 19 模型 5 的训练集抗压强度预测值与试验值对比

Fig. 19 Comparison Between Predictive Values and Experimental Values of Compressive Strengths in Training Set of Model 5

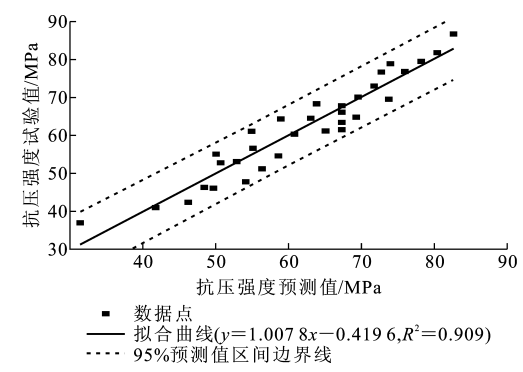


图 20 模型 5 的测试集抗压强度预测值与试验值对比

Fig. 20 Comparison Between Predictive Values and Experimental Values of Compressive Strengths in Test Set of Model 5

3.2 各模型比较

由模型 1~5 的残差图可知,残差均随机分布在 0 值周围,说明各模型可以较好地预测试验值。同时,由模型 1~5 的训练集和测试集预测值与试验值关系可知,各模型随试验数据的变化趋势基本相同,没有存在系统性的离散。因此,模型 1~5 都可以预测锂渣混凝土抗压强度,但各模型的精确度有所差异。

为了选出较优模型,本文主要使用 3 种性能测量指标比较模型 1~5。3 种性能评价指标为均方根误差、平均绝对误差和平均绝对百分比误差。各模型的性能评价结果具体见表 2。

表 2 各模型的评价结果
Tab. 2 Evaluation Results of Models

| 模型 编号 | R^2 | 训练集 | | | 测试集 | | |
|----------|-------|-------------------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| | | $E_{RMS}/$ MPa | $E_{MA}/$ MPa | $E_{MAP}/$ % | $E_{RMS}/$ MPa | $E_{MA}/$ MPa | $E_{MAP}/$ % |
| 1 | 0.907 | 4.268 | 3.47 | 6.15 | 4.666 | 3.92 | 6.79 |
| 2 | 0.901 | 4.475 | 3.61 | 6.63 | 4.974 | 4.19 | 7.24 |
| 3 | 0.884 | 4.713 | 3.95 | 6.90 | 4.735 | 4.03 | 6.80 |
| 4 | 0.895 | 4.628 | 3.81 | 7.03 | 5.009 | 4.19 | 7.18 |
| 5 | 0.920 | 4.108 | 3.37 | 6.06 | 3.684 | 3.15 | 5.44 |

基于表 2 的结果,本文得到:

(1)对于可决系数 R^2 值,模型 1,2,5 的 R^2 值较大,其中模型 5 的 R^2 值最大,为 0.920。

(2)对于 E_{RMS} 指标值,依据训练集结果,模型 1,2,5 较好,其中模型 5 优于模型 1,模型 1 优于模型 2;依据测试集结果,模型 1,3,5 较好,其中模型 5 优于模型 1,而模型 1 优于模型 3;综合来看,模型 5 的 E_{RMS} 值相对最小,模型 1 次之。

(3)对于 E_{MA} 指标值,依据训练集结果,模型 1,2,5 较好,其中模型 5 优于模型 1,模型 1 优于模型 2;依据测试集结果,模型 1,3,5 较好,其中模型 5 优于模型 1,模型 1 优于模型 3;综合评价,模型 5 的 E_{MA} 值相对最小,模型 1 次之。

(4)对于 E_{MAP} 指标值,依据训练集结果,模型 1,2,5 较好,其中模型 5 优于模型 1,模型 1 优于模型 2;依据测试集结果,模型 1,3,5 较好,其中模型 5 优于模型 1,模型 1 优于模型 3;综合评价,模型 5 的 E_{MAP} 值相对最小,模型 1 次之。

综上所述,作为锂渣混凝土 28 d 抗压强度预测模型,模型 5 较优,模型 1 次之。以上建议模型中,虽然没有包含粗骨料、细骨料、锂渣细度等因素,但是这并不意味着它们对锂渣混凝土强度没有影响,只是因为它们对锂渣混凝土强度的影响不太显著,贡献很小,所以没有出现在强度模型中。

4 结 语

(1)水胶比、锂渣掺量和减水剂掺量对锂渣混凝土强度的影响十分显著。

(2)模型评价中,各建议模型的残差值均随机散落在 0 值周围,预测值的最高相对误差约为 15%,预测值数据均落在 95%预测值区间,说明各建议模

型均有较好的精确度。

(3)各建议模型经均方根误差、平均绝对误差和平均绝对百分比误差以及模型 R^2 值等指标的综合评价后,发现模型 5 的各项指标值相对最小,为最佳的预测模型。

(4)本文建立的锂渣混凝土抗压强度非线性预测模型存在一定的局限,其有效性还有待更多试验数据检验,且适用 52.5 级普通硅酸盐水泥型号的锂渣混凝土强度模型也有待建立,这将是进一步研究的方向。

参考文献:

References:

[1] POPOVICS S. 粉煤灰混凝土的强度关系式[J]. 混凝土及加筋混凝土,1984(1):45-52.
POPOVICS S. Strength Relation of Fly Ash Concrete [J]. Concrete and Reinforced Concrete,1984(1):45-52.

[2] 杨钱荣,吴学礼,张凌翼. 粉煤灰混凝土的双变量强度公式[J]. 建筑材料学报,2002,5(2):186-189.
YNAG Qian-rong,WU Xue-li,ZHANG Ling-yi. Two Variable Strength Formula of Fly Ash Concrete[J]. Journal of Building Materials,2002,5(2):186-189.

[3] GARCIA N M,ZAPATA L E,SUAREZ O M,et al. Effect of Fly Ash and Nanosilica on Compressive Strength of Concrete at Early Age[J]. Advances in Applied Ceramics,2015,114(2):99-105.

[4] HACENE S M A B,GHOMARI F,SCHOEFS F, et al. Probabilistic Modelling of Compressive Strength of Concrete Using Response Surface Methodology and Neural Networks[J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2014,39(6):4451-4460.

[5] PENG C H,YEH I C,LIEN L C. Building Strength Models for High-performance Concrete at Different Ages Using Genetic Operation Trees,Nonlinear Regression,and Neural Networks[J]. Engineering with Computers,2010,26(1):61-73.

[6] 王文斌. 粉煤灰的活性激发与大掺量粉煤灰砼的试验研究[D]. 西安:西北工业大学,2005.
WANG Wen-bin. Experimental Study on the Activity of Fly Ash and Fly Ash Concrete with Large Amount of Fly Ash [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University,2005.

[7] 冯 力. 回归分析方法原理及 SPSS 实际操作[M]. 北京:中国金融出版社,2004.
FENG Li. The Principle of Regression Analysis Method and the Practical Operation of SPSS[M]. Beijing:China Financial Publishing House,2004.

- [8] 赵若鹏,郭自力,张晶,等.内掺锂渣和硅粉的 100 MPa 高强度大流动性混凝土研究[J].工业建筑,2004,34(12):61-62.
ZHAO Ruo-peng, GUO Zi-li, ZHANG Jing, et al. Study on High Strength and High Fluidity Concrete with Lithium Slag and Silica Fume[J]. Industrial Construction, 2004, 34(12): 61-62.
- [9] 刘来宝.掺锂渣 C50 高性能混凝土的力学与徐变性能[J].混凝土与水泥制品,2012(1):67-69.
LIU Lai-bao. Mechanical and Creep Properties of C50 High Performance Concrete Mixed with Lithium Slag [J]. China Concrete and Cement Products, 2012(1): 67-69.
- [10] 张善德.锂渣高性能混凝土强度预测及圆环法早期抗裂性试验研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2011.
ZHANG Shan-de. Forecasting of Lithium-slag High-performance Concrete Strength and Ring Method Test on Its Early-age Anti-crack Capability[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2011.
- [11] 温勇,刘国君,秦志勇,等.锂渣粉对混凝土氯离子渗透性的影响[J].混凝土,2011(8):76-78.
WEN Yong, LIU Guo-jun, QIN Zhi-yong, et al. Study on the Effect of Lithium Slag Powders Upon the Chloride Penetration of Concrete[J]. Concrete, 2011 (8): 76-78.
- [12] 费文斌.利用锂渣取代部分水泥配制混凝土[J].水泥技术,1998(6):36-40.
FEI Wen-bin. Use Lithium Slag to Partially Substitute Cement in the Proportion of Concrete [J]. Cement Technology, 1998(6): 36-40.
- [13] 许开成,聂行,陈梦成,等.掺锂渣钢筋混凝土梁的受弯性能试验研究[J].铁道建筑,2016(3):13-16.
XU Kai-cheng, NIE Hang, CHEN Meng-cheng, et al. Experimental Study on Flexural Performance of Reinforced Concrete Girder Mixed with Lithium Slag[J]. Railway Engineering, 2016(3): 13-16.
- [14] 于江,严文龙,秦拥军,等.掺锂渣再生粗骨料混凝土抗压强度试验研究[J].混凝土与水泥制品,2015(8):94-98.
YU Jiang, YAN Wen-long, QIN Yong-jun, et al. Experimental Study on Compressive Strength of Recycled Coarse Aggregate Concrete Mixed with Lithium Slag[J]. China Concrete and Cement Products, 2015 (8): 94-98.
- [15] 张广泰,董海蛟,温勇.冻融循环下锂渣粉对混凝土渗透性的影响[J].混凝土与水泥制品,2015(3):83-86.
ZHANG Guang-tai, DONG Hai-jiao, WEN Yong. Effect of Lithium Slag Powder on the Permeability of Concrete Under Freezing and Thawing Cycles [J]. China Concrete and Cement Products, 2015(3): 83-86.
- [16] 杨恒阳.复掺锂渣、粉煤灰高性能混凝土强度及早期抗裂性能试验研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2012.
YANG Heng-yang. Experimental Study on the Strength and the Cracking Resistance at Early Ages of High-performance Concrete Added with Lithium Slag and Fly Ash[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2012.
- [17] 李志军.复掺锂渣、钢渣高性能混凝土强度及早期抗裂性能试验研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.
LI Zhi-jun. Experimental Study on the Strength and the Cracking Resistance at Early Ages of High-performance Concrete Added with Lithium Slag and Steel Slag[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013.
- [18] 吴福飞,陈亮亮,侍克斌,等.锂渣高性能混凝土的性能与微观结构[J].科学技术与工程,2015,15(12):219-222.
WU Fu-fei, CHEN Liang-liang, SHI Ke-bin, et al. Properties and Microstructure of HPC with Lithium-slag[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(12): 219-222.
- [19] 吴福飞,陈亮亮,赵经华,等.锂渣混凝土的孔结构参数与活性评价研究[J].人民长江,2015,46(16):58-61,92.
WU Fu-fei, CHEN Liang-liang, ZHAO Jing-hua, et al. Research on Pore Structure Parameters and Activity of Lithium Slag Concrete [J]. Yangtze River, 2015, 46(16): 58-61, 92.
- [20] 郭江华,侍克斌.锂渣混凝土抗压与劈拉试验研究[J].粉煤灰,2015(4):27-28,32.
GUO Jiang-hua, SHI Ke-bin. Compressive and Splitting Tensile Test of Lithium Slag Concrete [J]. Coal Ash, 2015(4): 27-28, 32.
- [21] 管松梅,吴福飞.锂渣混凝土在青年渠首工程中的应用初探[J].新疆水利,2014(5):22-25,34.
GUAN Song-mei, WU Fu-fei. Preliminary Study on the Application of Lithium Slag Concrete in the First Project of Youth Canal [J]. Xinjiang Water Resources, 2014(5): 22-25, 34.
- [22] 赵强善.锂渣作为混凝土掺合料的可行性研究[J].中国西部科技,2014,13(7):36-37.
ZHAO Qiang-shan. Research on the Feasibility of Using Lithium Slag as Mineral Admixture in Concrete [J]. Science and Technology of West China, 2014, 13

- (7):36-37.
- [23] 范 勇,侍克斌. 水工高性能锂渣泵送混凝土的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(3):119-122.
FAN Yong, SHI Ke-bin. Research on the High Performance of Concrete Mixed with Lithium Slag in Hydraulic Structures[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(3):119-122.
- [24] 许开成,毕丽苹,陈梦成. 多因素影响下锂渣混凝土的组分优化分析研究[J]. 混凝土, 2016(8):90-94, 98.
XU Kai-cheng, BI Li-ping, CHEN Meng-cheng. Analysis Research on the Composition Optimization of Lithium Slag Concrete Based on Multi-factor Effects [J]. Concrete, 2016(8):90-94, 98.
- [25] 王国强. 锂渣高性能混凝土收缩与抗裂性能研究 [D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2011.
WANG Guo-qiang. Study on Crack Resistance of High Performance Concrete with Lithium-slag [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2011.
- [26] 吴福飞,陈亮亮,侍克斌,等. 锂渣混凝土的氯离子渗透性能与活性评价[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(17):227-231.
WU Fu-fei, CHEN Liang-liang, SHI Ke-bin, et al. Chloride Ion Penetration and Activity Evaluation of Lithium Slag Concrete [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(17):227-231.
- [27] 祝战奎. 锂渣复合渣高强高性能自密实混凝土研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2007.
ZHU Zhan-kui. Study on High Strength High Performance Self Compacting Concrete Containing Lithium Slag Composite Slag [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [28] 张兰芳,陈剑雄,岳 瑜,等. 锂渣高强混凝土的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2005(3):29-31.
ZHANG Lan-fang, CHEN Jian-xiong, YUE Yu, et al. Experimental Study on High Strength Concrete with Lithium Slag [J]. New Building Materials, 2005(3): 29-31.
- [29] 张兰芳,陈剑雄,李世伟,等. 锂渣混凝土的性能研究 [J]. 施工技术, 2005, 34(8):59-60, 68.
ZHANG Lan-fang, CHEN Jian-xiong, LI Shi-wei, et al. Performance Study of Lithium Cinder Concrete [J]. Construction Technology, 2005, 34(8):59-60, 68.
- [30] LI H F, GUO L, XIA Y. Mechanical Properties of Concretes Containing Super-fine Mineral Admixtures [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 174-177: 1406-1409.
- [31] WEN H. Property Research of Green Concrete Mixed with Lithium Slag and Limestone Flour [J]. Advanced Materials Research, 2013, 765-767:3120-3124.
- [32] 祝战奎,陈剑雄. 超磨细锂渣复合掺和料自密实高强混凝土抗碳化性能研究[J]. 施工技术, 2012, 41(22): 40-42.
ZHU Zhan-kui, CHEN Jian-xiong. Study of Carbonation Resistance of Self-compacting High-strength Concrete with Composite Admixture of Ultra-fine Lithium Slag [J]. Construction Technology, 2012, 41(22):40-42.
- [33] 胡志远. 锂渣复合渣混凝土研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2008.
HU Zhi-yuan. Study on Concrete Mixing Lithium Slag with Other Mineral Admixtures [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [34] 赵若鹏,付书红,郭自力,等. 掺锂渣的 C80 高强度大流动性混凝土的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(1):38-40, 71.
ZHAO Ruo-peng, FU Shu-hong, GUO Zi-li, et al. Experimental Study on C80 High Strength and High Fluidity Concrete Added with Lithium Slag [J]. Industrial Construction, 2001, 31(1):38-40, 71.
- [35] 赵若鹏,郭玉顺,郭自力,等. C80 高强度大流动性混凝土的试验研究[J]. 工业建筑, 1997, 27(10):41-46, 57.
ZHAO Ruo-peng, GUO Yu-shun, GUO Zi-li, et al. Experimental Study on C80 High-Strength and High Fluidity Concrete [J]. Industrial Construction, 1997, 27(10):41-46, 57.
- [36] 温 和. 锂盐渣复合粉体制备与混凝土研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2006.
WEN He. Research on Preparation and Concrete of Lithium Slag Composite Powder [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [37] AMINI K, JALALPOUR M, DELATTE N. Advancing Concrete Strength Prediction Using Non-destructive Testing: Development and Verification of a Generalizable Model [J]. Construction and Building Materials, 2016, 102(4):762-768.
- [38] KOSTIC S, VASOVIC D. Prediction Model for Compressive Strength of Basic Concrete Mixture Using Artificial Neural Networks [J]. Neural Computing and Applications, 2015, 26(5):1005-1024.
- [39] MOUTASSEM F S, CHIDIAC S E. Assessment of Concrete Compressive Strength Prediction Models [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(1): 343-358.
- [40] CHENG M Y, FIRDAUSI P M, PRAYOGO D. High-performance Concrete Compressive Strength Prediction Using Genetic Weighted Pyramid Operation Tree (GWPOT) [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014, 29(3):104-113.