

混凝土抗压强度尺寸效应的神经网络预测模型

金 浏, 赵 瑞, 杜修力

(北京工业大学城市减灾与防灾防护教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 为了探究各影响因素对混凝土抗压强度尺寸效应现象的作用机理,从混凝土材料层面出发,建立基于BP神经网络的混凝土抗压强度预测模型. 结合大量已有试验结果,建立可考虑试件形状、截面尺寸、高宽比、养护龄期、水灰比、水泥标号和粗骨料最大粒径等7个特性影响的人工神经网络模型. 根据上述输入特征,对不同截面尺寸的混凝土抗压强度进行预测分析,并研究相关因素对混凝土抗压强度尺寸效应现象的影响程度. 结果表明:1) 水灰比对混凝土抗压强度尺寸效应的影响较大,其值越小,抗压强度的尺寸效应越明显;2) 高宽比的增大会导致尺寸效应的增强,但当高宽比大于2时,尺寸效应趋于平稳;3) 粗骨料粒径的增大会导致尺寸效应现象愈加明显,但其增长速度会随着粗骨料粒径的提高而不断降低;4) 试件形状对于普通混凝土的抗压强度尺寸效应现象的影响可忽略.

关键词: 混凝土; 尺寸效应; 抗压强度; BP神经网络; 强度预测模型; 细观结构

中图分类号: TU 528.2

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2021)03-0260-09

doi: 10.11936/bjtxb2020010020

Neural Network Prediction Model of Concrete Compressive Strength Size Effect

JIN Liu, ZHAO Rui, DU Xiuli

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To explore the mechanism of the influence factors on the size effect of concrete compressive strength, a prediction model of concrete strength by BP neural network was established from the concrete material level in this study. An artificial neural network model was established by using seven input characteristics, namely, specimen shape, specimen section size, specimen height/diameter ratio, curing age, water-cement ratio, cement mark and maximum coarse aggregate particle size. According to the above input characteristics, the compressive strength of different section sizes was predicted, and the influence of various factors on concrete size effect was studied. Results show that the water-cement ratio has a great influence on the size effect of compressive strength of concrete with the decrease of its value, and the size effect becomes more obvious. The increase of the aspect ratio leads to the enhancement of size effect. When the aspect ratio is greater than 2, the size effect tends to be stable. The size effect becomes more and more obvious with the increase of the coarse aggregate size, however, the growth rate decreases with the increase of the coarse aggregate size. The influence of specimen shape on the size

收稿日期: 2020-01-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1504302);国家自然科学基金资助项目(51822801).

作者简介: 金浏(1985—),男,教授,博士生导师,主要从事混凝土与混凝土结构方面的研究, E-mail: jinliu@bjut.edu.cn

通信作者: 杜修力(1962—),男,长江学者特聘教授,博士生导师,主要从事地震工程方面的研究, E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn

effect of compressive strength of ordinary concrete can be ignored.

Key words: concrete; size effect; compressive strength; BP neural network; strength prediction model; microstructure

尺寸效应,是指以强度为代表的力学性能指标不再为常数,而是随着试件尺寸的增加而变化.混凝土强度是混凝土最重要的性能之一,也是混凝土尺寸效应研究的核心内容.普通混凝土的强度可以用水灰比为单因子的线性函数加以表达,如鲍罗米公式,但对于大体积混凝土来说,其强度与各影响因素之间有着非常复杂的非线性关系,甚至存在各种因素的交互作用.

20世纪80年代以来,在混凝土尺寸效应方面,国内外学者对混凝土尺寸效应问题做了大量研究^[1-2],开展了大量的缩尺模型试验. Neville^[3]制备截面尺寸为70 mm×70 mm、125 mm×125 mm和150 mm×150 mm的立方体混凝土试件,经单轴抗压强度试验后得出结论:小尺寸试件明显具有较高的抗压强度,混凝土抗压强度具有尺寸效应.苏捷等^[4]对强度等级为C20、C40、C60的混凝土,分别制作截面尺寸为100 mm×100 mm、150 mm×150 mm、200 mm×200 mm,高宽比为2的混凝土棱柱体试件,单轴抗压试验的结果表明,混凝土轴心抗压强度和峰值应变具有明显的尺寸效应,且强度等级对混凝土抗压强度尺寸效应的影响较大. Sim等^[5]研究混凝土类型和粗骨料最大粒径对混凝土受压尺寸效应的影响,研究结果表明:骨料粒径对普通混凝土尺寸效应影响较轻,轻质混凝土大.朱尔玉等^[6]通过大量试验分析发现,不同形状(立方体、圆柱体及棱柱体)、不同尺寸的试件抗压强度的尺寸效应均表现出强烈的尺寸效应现象.杨忠义^[7]分析三峡工程全级配及其湿筛混凝土基本力学性能试验结果,统计计算相应工程混凝土强度的尺寸效应系数,合理解释在较早龄期全级配大试件抗压强度高于湿筛标准试件、并随龄期的增长此比值逐渐减小至小于1的趋势这一规律. Sim等^[8]配制高宽比分别为1.0和2.0的圆柱试件和棱柱体试件,研究尺寸和长宽比对轻质混凝土抗压强度的影响,结果表明,随着混凝土单位质量的降低,混凝土的尺寸效应增强,这一趋势在高宽比为2.0的试件中比高宽比为1.0的试件更为明显.

混凝土属于非均质准脆性复合材料^[9],其宏

观非线性源于其内部组成的非均质性^[10-12].各组成材料的成分、性质和配比以及黏结作用,都对混凝土的力学性能有着不同程度的影响.以往所进行的试验研究,因为试验条件的限制,无法同时考虑多个因素之间的耦合关系,缺少在多因素影响下的混凝土尺寸效应的相关研究,而经推导得出的尺寸效应相关理论模型也只能考虑有限几个因素,想要获得包含所有影响因素的显式公式是不现实的.

为了解决这些问题,神经网络被引入混凝土尺寸效应的相关研究中.神经网络可以通过分析大量积累的混凝土试验数据,掌握包含尺寸在内的各种因素与混凝土强度之间的潜在规律,然后根据这些规律,用新的数据推算出对应的混凝土强度.

在神经网络已广泛应用于混凝土相关研究的前提下,将其应用于尺寸效应这一问题的相关研究仍然不充分^[13-15],并且存在数据库规模较小而导致的模型所得结论可靠性较低的问题.本文所构建的数据库包含取自38篇已出版的国内外文献[15-52]中的1 073组数据,利用MATLAB提供的平台,初步建立多因素影响下的混凝土抗压强度的预测模型,在建立的预测模型的基础上,分析相关因素对混凝土抗压强度尺寸效应的影响机理.

1 神经网络预测模型建立及模拟结果

1.1 神经网络预测模型

神经网络是近年来迅猛发展的非线性科学技术,它模仿人类大脑机制,将通过网络训练从数据中概括出来的知识,以权值和阈值的形式,分布式存储于各神经元中,并利用这些知识来预测相似因素的结果.

采用神经网络对混凝土抗压强度进行精确预测,必须选用合适的输入特征.普通混凝土的抗压强度可以用水灰比为单因子的线性函数表达,当水泥标号相同时,水灰比越小,混凝土抗压强度越大,所以水灰比和水泥标号对混凝土抗压强度有影响.混凝土的抗压强度随着养护龄期的增长而不断提高,因此养护龄期也同样影响混凝土的抗压强度.混凝土的强度会随着试件尺寸的变化而发生改变,因此试件截面尺寸和试件高宽比等尺寸因素也是混

凝土抗压强度的影响因素. 各国研究人员在以往的缩尺试验中,验证了粗骨料最大粒径和试件形状对混凝土抗压强度尺寸效应现象的影响^[5-6].

通过以上讨论,本文选取试件截面尺寸、试件高宽比、水灰比、水泥标号、养护龄期、试件形状和粗骨料粒径作为混凝土抗压强度预测模型的输入特征. 为保证神经网络的精度,作者构建了一个包含 1 073

组数据的数据库,数据摘自国内外 38 篇文献,数据的统计特性如表 1 所示. 考虑到试件截面形状影响,将试件形状赋予不同的值,其中立方体为 1,棱柱体为 2,圆柱体为 3;考虑到不同水泥标号对抗压强度的影响,将不同标号的水泥赋予不同的值,标号 32.5 的水泥为 1,标号 32.5R 为 2,标号 42.5 为 3,标号 42.5R 为 4.

表 1 试验数据的统计特性

Table 1 Statistical characteristics of test data

项目	截面尺寸/(mm × mm)	试件截面形状	高宽比	龄期/d	水灰比	水泥标号	粗骨料粒径/mm
平均值	200 × 200	棱柱体	1.5	35.7	0.49	2.8	19.4
最大值	800 × 800	圆柱体	8.0	730.0	0.89	4.0	80.0
最小值	50 × 50	立方体	0.5	1.0	0.14	1.0	0.0

在神经网络模型的体系结构中,输入层中包含 7 个输入特征,即:试件截面尺寸、试件形状、高宽比、水灰比、水泥标号、养护龄期和粗骨料最大粒径,网络如图 1 所示. 输出层数为 1,输出特征为试件抗压强度. 输入层与输出层之间激活函数为 log-sigmoid 函数,隐藏层与输出层之间激活函数 tan-sigmoid 为函数.

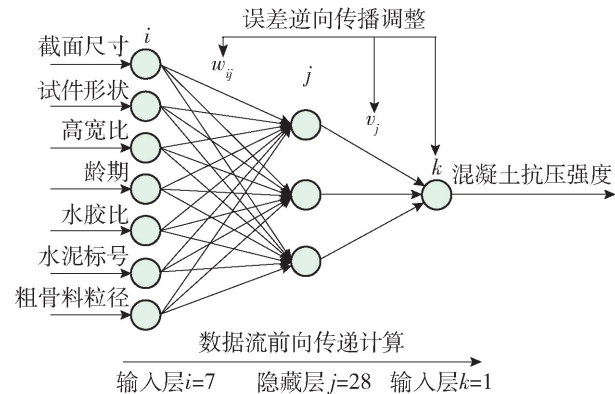


图 1 神经网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of neural network

为减少不必要的特征缩放效果,在训练神经网络之前,对数据库进行归一化处理. 这是一个重要的预处理步骤,因为 log-sigmoid 传输函数只能识别 0~1 的值,且在接近 0 和 1 时,函数曲线比较平缓,变化速度非常缓慢. 为减少网络学习时间,将输入输出数据变化控制在 0.1~0.9,使得 log-sigmoid 函数在此区间中变化梯度比较大,网络收敛速度大大加快,从而改善网络性能. 变换方式^[53]为

$$x^* = 0.1 + 0.8 \times \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中: x 为未经归一化的数据真实值; x_{\max} 、 x_{\min} 分别为真实值中的最大值和最小值; x^* 为归一化后的值.

1.2 BP 神经网络预测模型的建立

BP 神经网络作为应用最广泛的神经网络,具有理论依据充分、推导过程严谨、物理概念清晰、通用性好等优点,是混凝土抗压强度预测中常用的神经网络^[54].

在确定隐藏层神经元数量时,需对具有不同隐藏层神经元的神经网络结构进行反复试算,获得预测效果最佳的神经网络结构. 1 073 组数据样本被随机分为训练样本(70%)、检验样本(15%)和预测样本(15%),以检验样本的均方误差(mean square error, MSE)作为神经网络终止训练的准则,均方误差越小,神经网络精度越高,网络性能越好. 训练样本、检验样本、预测样本和总样本的回归值(R^2)则用来度量输出值与目标之间的相关性.

神经网络的结构可简写为 NN7-n-1,其中第 1 个数字表示输入特征的个数, n 是隐藏层神经元数目,最后 1 个数字表示输出值个数. 图 2、3 给出具有不同数量隐藏层神经元的样本整体回归值和检验样本均方误差值. 经对比发现性能最好的网络为 NN7-28-1,在网络整体回归情况(R^2)较好的同时,该网络的检验样本 MSE 最小.

1.3 模拟结果

预测模型构建完成后,对训练样本进行迭代训练,直到通过验证样本对网络的误差检验,达到收敛为止迭代结束,这样可以避免过拟合现象. 迭代结果如图 4、5 所示,训练后的样本整体回归值为 0.962 2,模型训练情况良好,预测样本回归值为

0.958 4,模型具有良好的预测性能.

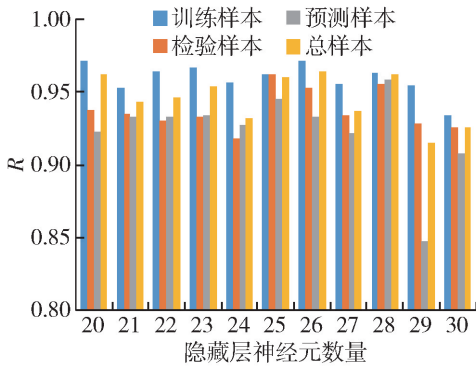


图2 具有不同数量隐藏层神经元的网络回归值

Fig.2 Network regression values with different number of hidden layer neurons

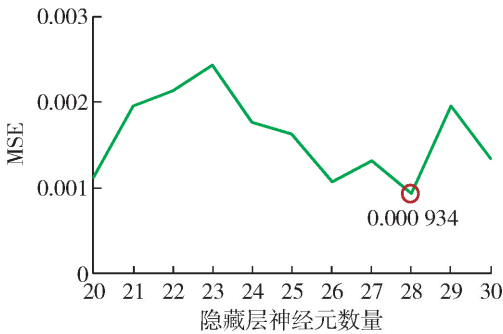


图3 具有不同数量隐藏层神经元的均方误差

Fig.3 Mean square error with different number of hidden layer neurons

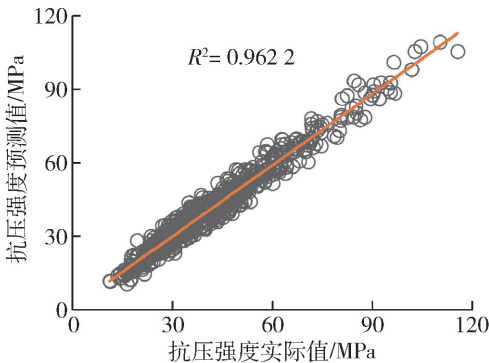


图4 样本整体的拟合情况

Fig.4 Fitting results of the total sample set

2 各影响因素对尺寸效应的影响

2.1 尺寸效应度

引入尺寸效应度对各试件抗压强度的尺寸效应进行定量描述. 以基准截面尺寸(100 mm × 100 mm)混凝土试件与不同截面尺寸的混凝土试件

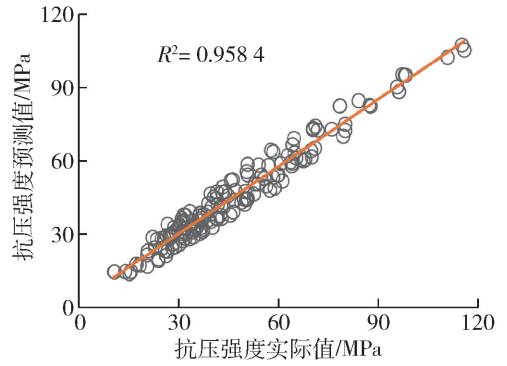


图5 预测样本的拟合情况

Fig.5 Fitting results of the predicting sample set

的抗压强度的差值占基准尺寸试件抗压强度的百分率作为尺寸效应度(γ),其表达式^[4]为

$$\gamma = \frac{f_{c,100} - f_{c,d}}{f_{c,100}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: γ 为不同截面尺寸试件的尺寸效应度; $f_{c,100}$ 为基准尺寸(100 mm × 100 mm)试件的抗压强度; $f_{c,d}$ 为不同截面尺寸试件的抗压强度.

引入 γ 是为了更直观描述尺寸效应现象的程度. γ 越大,表明非基准尺寸试件的抗压强度偏离基准尺寸越大,尺寸效应现象越明显^[16].

2.2 水灰比的影响

将截面尺寸分别为100 mm × 100 mm、150 mm × 150 mm、200 mm × 200 mm、300 mm × 300 mm、400 mm × 400 mm,水灰比分别为0.20、0.25、0.30、0.35、0.40、0.45、0.50、0.55、0.60、0.65、0.70,水泥标号42.5,高宽比1.0,龄期28 d,粗骨料粒径20 mm的立方体试件数据带入到模型中,得到各试件的混凝土抗压强度.将混凝土抗压强度带入式(2)中,即可获得混凝土抗压强度 γ ,如图6所示.

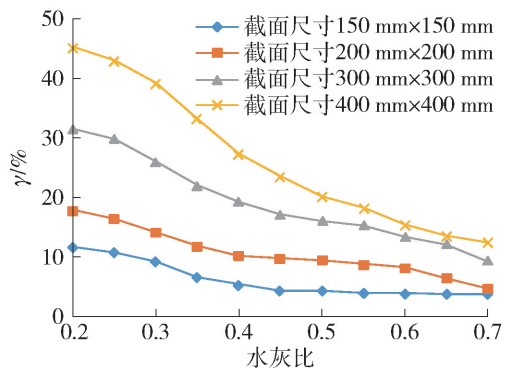


图6 不同水灰比混凝土试件的尺寸效应度

Fig.6 Size effect degree γ of concrete specimens with different water-cement ratios

从图6可知,随着混凝土水灰比的减小, γ 不断提高.当试件截面尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 时,水灰比为0.2的试件比水灰比为0.7的试件 γ 提高8.6%,当试件尺寸为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 时,水灰比为0.2的试件相比水灰比为0.7的试件提高32.7%.这是由于随着水灰比的减小,试件强度增大,脆性增强,从而导致尺寸效应现象更加明显.

同样,从图6中可以直观看到,在水灰比低至0.35~0.4时,随着水灰比的降低, γ 的增速变大,这是由于当水灰比降至0.4以下时,开始部分出现高强混凝土,而高强混凝土的结构密实,均质度高,其内部初始裂纹呈现出数量少、尺寸小的特征,裂缝开展时波及到的破坏区域小,破坏所需能量少,所以相较于水灰比较大的普通混凝土,水灰比较小的高强混凝土的 γ 增速更快.

2.3 粗骨料粒径的影响

将截面尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 、 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 、 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 、 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 、 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,粗骨料直径分别为10、20、30、40 mm,水灰比0.55,水泥标号42.50、高宽比1.0,龄期28 d的圆柱体试件数据带入到模型中,得到各试件的混凝土抗压强度.将混凝土抗压强度带入式(2)中,即可获得混凝土抗压强度 γ ,如图7所示.

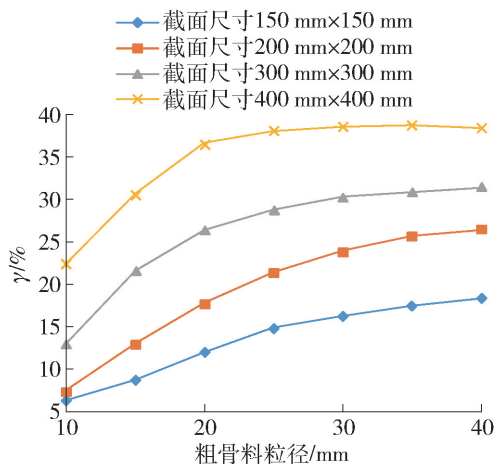


图7 不同粗骨料粒径混凝土试件的尺寸效应度

Fig. 7 Size effect degree γ of concrete specimens with different coarse aggregate diameters

由图7可知,随着粗骨料粒径的增加,混凝土 γ 不断提高.试件截面尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 时,骨料尺寸为40 mm试件的 γ 相较于骨料尺寸为10 mm试件提高12.1%,试件尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 时此数值为18.97%,试件尺寸为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 时,此数值为15.83%.不同

尺寸的试件随着粗骨料最大粒径的增加,均出现了尺寸效应更加明显的现象,究其原因是随着粗骨料粒径的增加,试件均有不同程度的脆性增加,进而导致尺寸效应越加明显.

从图7还可以看出,随着粗骨料粒径的增加, γ 的增加逐渐减慢.这是由于裂缝的开展过程中不可避免地会出现裂缝无法绕过粗骨料颗粒的情况,粗骨料粒径越大,被裂缝破坏的粗骨料颗粒越多,这会导致试件破坏所需的能量增加,试件抗压强度下降的趋势得到遏制, γ 的曲线斜率也不断降低.即使裂缝开展绕过粗骨料,粒径增大同样会导致裂缝长度增加,裂缝破坏区域增大,所需能量增加, γ 提高的趋势得到遏制.

2.4 试件形状的影响

将截面尺寸分别为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 、 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 、 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 、 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 、 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 、 $350\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ 、 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,水灰比0.55、水泥标号42.5、龄期28 d、粗骨料粒径20 mm、高宽比为1.0的立方体和圆柱体,以及高宽比为2的棱柱体和圆柱体的试件数据分别带入到模型中,得到各试件的混凝土抗压强度.将混凝土抗压强度带入式(2)中,即可获得混凝土抗压强度 γ ,如图8、9所示.

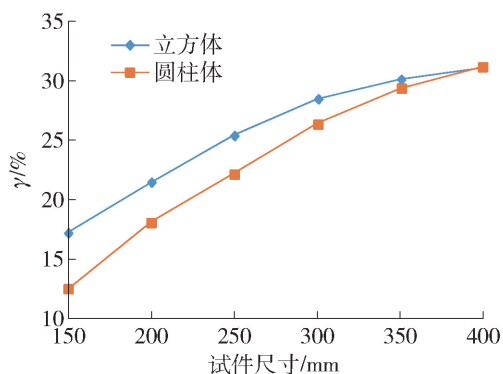


图8 立方体与圆柱体试件的尺寸效应度

Fig. 8 Size effect degree γ of cube and cylinder

由图8可知,在尺寸较小时,立方体的 γ 要高于圆柱体.当试件截面尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 时,两者 γ 的差值为4.71%,而当试件尺寸为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 时,两者差值为0.1%,可以看出随着尺寸的提高,两者的 γ 差值不断减小,立方体和圆柱体的形状区分对尺寸效应现象的影响不断降低;从图9可知,棱柱体的 γ 要略微高于圆柱体,但差值不大,且随着试件尺寸的增加,2种形状的混凝土试件的 γ 的差值并没有明显的变化,圆柱体与棱

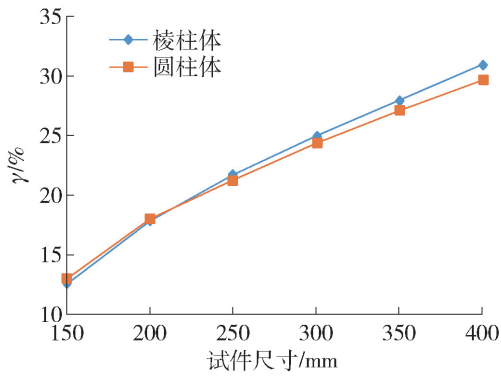


图9 棱柱体与圆柱体混凝土试件的尺寸效应度

Fig. 9 Size effect degree γ of prism and cylinder concrete specimen

柱体的形状区分对试件的尺寸效应现象没有太大的影响。

2.5 高宽比的影响

将试件截面尺寸为 100 mm × 100 mm、150 mm × 150 mm、200 mm × 200 mm、300 mm × 300 mm、400 mm × 400 mm,水灰比 0.55,水泥标号 42.5,龄期 28 天,粗骨料粒径 20 mm,高宽比分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 的棱柱体试件分别带入到模型中,得到各试件的混凝土抗压强度. 将混凝土抗压强度带入式(2)中,即可获得混凝土抗压强度 γ ,如图 10 所示。

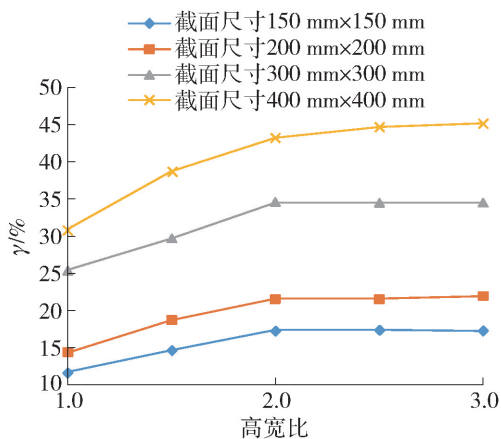


图10 不同高宽比混凝土试件的尺寸效应度

Fig. 10 Size effect degree γ of concrete specimens with different aspect ratios

从图 10 可以看出,随着高宽比的提高,试件尺寸效应现象越加增强,试件尺寸为 150 mm × 150 mm 时,高宽比为 3.0 的试件相较于高宽比为 1.0 的试件 γ 增加了 5.57%,试件尺寸为 400 mm × 400 mm 时,此数值为 14.31%。之所以试件的 γ 不

断增强,是因为随着高宽比的增加,试件在试验过程中所受到的环箍效应不断降低,试件脆性提高,抗压强度不断降低, γ 也不断提高。

当试件高宽比大于 2.0 时,试件中间区域已无环箍效应,强度不再降低, γ 的曲线便趋近于水平直线。

3 权重贡献率分析

人工神经网络的工作原理是将输入转化为所需输出,但通常情况下不能直观理解输入特征转化为输出值的详细机制. 因此,引入权重贡献率分析法来直观理解各输入特征与输出值之间的关系。

所谓权重贡献率分析法,就是通过对神经网络训练后所得到的权值矩阵进行分析,进而获得各输入特征对输出值预测过程中贡献率,判别各输入特征的重要程度. 输入特征 i 的权重贡献率 W_i 计算公式^[55]为

$$W_i = \sum_{j=1}^{16} |w_{ij}| \left(|v_j| \left(\frac{|w_{ij}|}{\sum_{i=1}^6 w_{ij}} \right) \right) \quad (3)$$

式中: w_{ij} 为输入节点 i 与隐藏层节点 j 的连接权值; v_j 为隐藏层节点 j 与输出节点的连接权值。

将输出特征由抗压强度转变为不同尺寸试件的 γ ,图 11 反映了重新建模后的神经网络的拟合情况,其中 γ_p 为尺寸效应度的预测值. 可以看出,新建立的模型具有很高的准确性. 根据神经网络训练后得到的权值矩阵,可计算获得各输入特征对输出值(尺寸效应度)的影响程度占比. 从图 12 可以看出,试件截面尺寸和水灰比对 γ 的权重贡献率分别为 23% 和 20%,是影响抗压强度比最主要的参数,试件形状的权重贡献率为 6%,是对 γ 影响最小的参数。

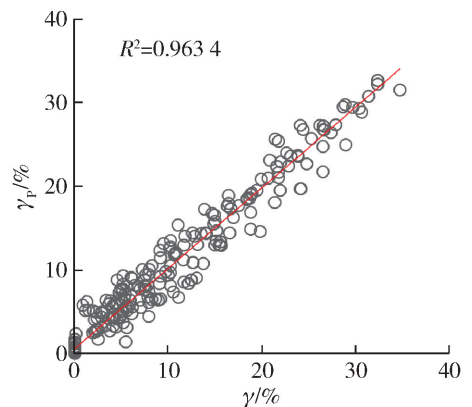


图11 尺寸效应度的拟合情况

Fig. 11 Fitting results of the total sample set

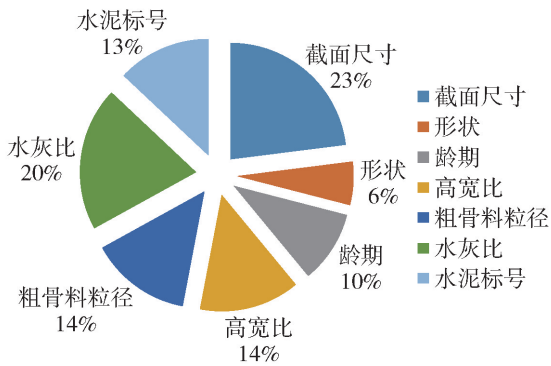


图 12 各输入特征对抗压强度比的影响程度

Fig. 12 Influence degree of each input characteristic against the compressive strength ratio

4 结论

1) 本文基于人工神经网络,以试件尺寸、试件形状、高宽比、龄期、水泥标号、水灰比和粗骨料粒径为输入特征,建立了混凝土抗压强度预测模型。模型数据量大,回归拟合良好,精确度高,可作为抗压强度计算工具应用于实际工程中。

2) 水灰比对混凝土抗压强度尺寸效应的较大,其权重贡献率达到 20%。随着水灰比的减小,尺寸效应现象越明显,且在水灰比低至约 0.4 时,随着水灰比的降低,尺寸效应度的增速变大。

3) 粗骨料粒径的增大会导致 γ 的增长,但 γ 的增长速度随粗骨料粒径的提高而不断降低。

4) 高宽比的增大会导致尺寸效应现象的提高,但当高宽比大于 2.0 时,尺寸效应现象会趋于稳定。

5) 试件形状的区别(圆柱体与棱柱体、圆柱体与立方体)对普通混凝土抗压强度尺寸效应现象的影响可忽略,其权重贡献率最低,为 6%。

参考文献:

[1] 杜敏, 杜修力, 金浏, 等. 混凝土拉压强度尺寸效应的细观非均质机理[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(3): 11-18.
DU M, DU X L, JIN L, et al. Meso-heterogeneity mechanism of the concrete size effect of tension and compressive strength[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(3): 11-18. (in Chinese)

[2] 李冬, 金浏, 杜修力, 等. 混凝土双轴压缩强度尺寸效应机理[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(8): 1190-1198.
LI D, JIN L, DU X L, et al. Mechanism of size effect of concrete under biaxial compression[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(8): 1190-1198. (in

Chinese)

[3] NEVILLE A M. The influence of size of concrete test cubes on mean strength and standard deviation[J]. Magazine of Concrete Research, 1996, 21(8): 31-37.

[4] 苏捷, 方志, 杨钻. 骨料组分和强度等级对混凝土单轴受压性能尺寸效应的影响[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 120-127.
SU J, FANG Z, YANG Z. Influence of aggregate mixture and strength grade on dimensional effect of concrete uniaxial compressive behavior [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(5): 120-127. (in Chinese)

[5] SIM J I, YANG K H, JEON J K. Influence of aggregate size on the compressive size effect according to different concrete types [J]. Construction and Building Materials, 2013, 44: 716-725.

[6] 朱尔玉, 杨威, 王建海, 等. 不同形状尺寸 C20 混凝土试件抗压强度的关系[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(1): 1-3, 13.
ZHU E Y, YANG W, WANG J H, et al. Relationship of compressive strength of specimens with various shapes and sizes for C20 MPa grade concrete [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 29(1): 1-3, 13. (in Chinese)

[7] 杨忠义. 全级配混凝土强度的尺寸效应研究[J]. 水电站设计, 2008, 24(3): 11-14.
YANG Z Y. Study on size effect of strength of fully graded concrete [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2008, 24(3): 11-14. (in Chinese)

[8] SIM J I, YANG K H, KIM H Y, et al. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 854-864.

[9] BAZANT Z P, PLANAS J. Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials[M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1998: 7-15.

[10] DU X L, JIN L, MA G W. Meso-element equivalent method for the simulation of macro mechanical properties of concrete [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2013, 22(5): 617-642.

[11] DU X L, JIN L, MA G W. A meso-scale analysis method for the simulation of nonlinear damage and failure behavior of reinforced concrete members [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2013, 22(6): 878-904.

[12] 杜修力, 金浏, 李冬. 混凝土与混凝土结构尺寸效应述评(I): 材料层次[J]. 土木工程学报, 2017, 50(9): 28-45.
DU X L, JIN L, LI D. A state-of-the-art review on the size effect of concretes and concrete structures (I): concrete materials[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(9): 28-45. (in Chinese)

[13] YANG Q W, DU S G. Prediction of concrete cubic

- compressive strength using ANN based size effect model [J]. *CMC-Computers Materials & Continua*, 2015, 47(3): 217-236.
- [14] ORETA A. Simulating size effect on shear strength of RC beams without stirrups using neural networks [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(5): 681-691.
- [15] 唐腾飞, 黄耀英, 练迪, 等. 混凝土棱柱体试件抗压强度尺寸效应探讨[J]. *人民黄河*, 2017, 39(12): 142-145.
TANG T F, HUANG Y Y, LIAN D, et al. Study on size effect on compressive strength of concrete prism specimen [J]. *Yellow River*, 2017, 39(12): 142-145. (in Chinese)
- [16] 苏捷, 方志. 不同骨料组分混凝土立方体抗压强度尺寸效应试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(2): 152-157.
SU J, FANG Z. Experimental study on impact of aggregate mixture on dimensional effect of concrete cubic compressive strength[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(2): 152-157. (in Chinese)
- [17] 惠弘毅, 李宗利, 杨华, 等. 不同强度等级混凝土尺寸效应试验研究[J]. *混凝土*, 2015(7): 31-34.
HUI H Y, LI Z L, YANG H, et al. Experimental study on impact of strength grade on size effect of concrete strength[J]. *Concrete*, 2015(7): 31-34. (in Chinese)
- [18] 杨钊. 混凝土尺寸效应的细观数值分析及试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
YANG Z. Microscopic numerical simulation and test study on concrete size effect [D]. Changsha: Hunan University, 2009. (in Chinese)
- [19] 董莉莉. 不同强度等级混凝土抗压强度尺寸效应研究[J]. *市政技术*, 2015, 33(6): 187-190, 193.
DONG L L. On size effect of concrete compressive strength under different strength grades [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2015, 33(6): 187-190, 193. (in Chinese)
- [20] YI S T, YANG E I, CHOI J C. Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compressive strength of concrete[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2006, 236(2): 115-127.
- [21] CHE Y, BAN S L, CUI J Y, et al. Effect of specimen shape and size on compressive strength of concrete[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 163: 1375-1379.
- [22] 孙齐圣. C30 钢纤维混凝土强度尺寸效应试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
SUN Q S. Experimental study on size effect of C30 steel fiber reinforced concrete [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017. (in Chinese)
- [23] 张帮强. 三级配矿渣混凝土力学性能尺寸效应试验研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2016.
ZHANG B Q. Research on the size effect of three-graded aggregate concrete behavior in mechanics performance [D]. Xiayang: Northwest Agriculture and Forestry University, 2016. (in Chinese)
- [24] 杨海涛, 田石柱. 再生混凝土材料抗压强度尺寸效应试验研究[J]. *铁道建筑*, 2013(6): 166-168.
YANG H T, TIAN S Z. Experimental study on compressive strength size effect of recycled concrete materials[J]. *Railway Engineering*, 2013(6): 166-168. (in Chinese)
- [25] 高丹盈, 王勤学, 李翔宇. 龄期和尺寸对纤维矿渣微粉混凝土抗压强度的影响[J]. *工业建筑*, 2011, 41(增刊1): 739-742, 767.
GAO D Y, WANG Q X, LI X Y. Influence of ages and dimension on the compressive strength of fiber reinforced slag concrete [J]. *Industrial Construction*, 2011, 41(Suppl 1): 739-742, 767. (in Chinese)
- [26] 刘增晨, 蒋利, 成莞莞, 等. 高强混凝土抗压抗拉强度的尺寸效应[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(30): 209-213.
LIU Z C, JIANG L, CHENG W W, et al. Size effect of compressive and tensile strength of high strength concrete [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(30): 209-213. (in Chinese)
- [27] YAZICI S, SEZER G I. The effect of cylindrical specimen size on the compressive strength of concrete[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(6): 2417-2420.
- [28] BLANKS R F, MCNAMARA C C. Mass concrete tests in large cylinders[J]. *ACI Struct*, 1935, 31: 280-303.
- [29] AN M Z, ZHANG L J, YI Q X. Size effect on compressive strength of reactive powder concrete [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 18(2): 279-282.
- [30] XU J, HE X. Size effect on the strength of a concrete member [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1990, 35(45): 687-695.
- [31] BILIM C, ATIS C D, TANYILDIZI H, et al. Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network [J]. *Advances in Engineering Software*, 2009, 40(5): 334-340.
- [32] M S, SUDHARSHAN R, MD A S, et al. Modeling of compressive strength for self-consolidating high-strength concrete incorporating palm oil fuel ash [J]. *Materials*, 2016, 9(5): 396-409.
- [33] HAN S H, KIM J K, PARK Y D. Prediction of compressive strength of fly ash concrete by new apparent activation energy function [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(7): 965-971.
- [34] 周红. 混凝土强度尺寸效应的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.

- ZHOU H. Experimental study on size effect of concrete strength[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [35] MUCIACCIA G, ROSATI G, DI LUZIO G. Compressive failure and size effect in plain concrete cylindrical specimens [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 137: 185-194.
- [36] VISO J R D, CARMONA J R, RUIZ G. Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(3): 386-395.
- [37] MOUTASSEM F, CHIDIAC S E. Assessment of concrete compressive strength prediction models [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 20(1): 343-358.
- [38] NAMYONG J, SANGCHUN Y, HONGBUM C. Prediction of compressive strength of in-situ concrete based on mixture proportions[J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2004, 3(1): 9-16.
- [39] LI Y, TAO J L, LEI T, et al. Experimental study on compressive strength of recycled concrete[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 7(1): 75-78.
- [40] 梁天宇. 粗集料对混凝土抗压强度影响的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
LIANG T Y. A study on the influence of coarse aggregate on the compressive strength of concrete[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese)
- [41] 张学兵. 再生混凝土改性及配合比设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
ZHANG X B. Study on the modification of recycled concrete and its mixture design[D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese)
- [42] 常彦铮. 再生混凝土抗压试验的数值模拟与等效抗压强度折减系数研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
CHANG Y Z. Numerical simulation and equivalent reduction coefficient of compressive strength of recycled concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese)
- [43] TOKYAY M, OZDEMIR M. Specimen shape and size effect on the compressive strength of higher strength concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1997, 27(8): 1281-1289.
- [44] LEE K M, LEE H K, LEE S H, et al. Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag[J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(7): 1279-1285.
- [45] ONER A, AKYUZ S. An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(6): 505-514.
- [46] TOKYAY M. Strength prediction of fly ash concretes by accelerated testing[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(11): 1737-1741.
- [47] JIANG L H, MALHOTRA V M. Reduction in water demand of non-air-entrained concrete incorporating large volumes of fly ash[J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(11): 1785-1789.
- [48] DURÁN-HERRERA A, JUÁREZ C A, VALDEZ P, et al. Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(1): 39-45.
- [49] BHARATKUMAR B H, RAGHUPRASAD B K, RAMACHAND RAMURTHY D S, et al. Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance concrete [J]. *Materials and Structures*, 2005, 38(1): 63-72.
- [50] POON C S, LAM L, WONG Y L. A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(3): 447-455.
- [51] LAM L, WONG Y L, POON C S. Effect of fly ash and silica fume on compressive and fracture behaviors of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1998, 28(2): 271-283.
- [52] SIDERIS K K, KONSTA GDOUTOS M. Influence of the water to cement ratio W/C on the compressive strength of concrete—an application of the cement hydration equation to concrete[J]. *Applied Composite Materials*, 1996, 3(5): 335-343.
- [53] 索胜军, 孙光伟. 几种改进 BP 算法的比较[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(1): 80-83.
SUO S J, SUN G W. Comparison of several improved BP algorithms [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 2000, 33(1): 80-83. (in Chinese)
- [54] BOUKLI HACENE, S M A, GHOMARI F, SCHOEFS F, et al. Probabilistic modeling of compressive strength of concrete using response surface methodology and neural networks [J]. *Arabian Journal Science Engineering*, 2014, 39(6): 4451-4460.
- [55] 李祚泳, 丁恒康. BP 网络应用于大气颗粒物的源解析 [J]. *中国环境监测*, 2005, 21(2): 74-76, 83.
LI Z Y, DING H K. Application of BP neural network to sources apportionment of atmospheric particulates [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, 21(2): 74-76, 83. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)