

引用本文:陈凌阳,崔郎郎,陈永辉,等. BP神经网络预测橡胶隔震支座竖向刚度[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(6): 83-90.
CHEN Lingyang, CUI Langlang, CHEN Yonghui, et al. Prediction of vertical stiffness of rubber isolation bearings by BP neural network[J].
Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(6): 83-90.

DOI:10.19815/j.jace.2022.03092

BP神经网络预测橡胶隔震支座竖向刚度

陈凌阳¹, 崔郎郎², 陈永辉¹, 王宇航³, 柯珂^{1,3}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中信重工机械股份有限公司, 河南 洛阳 471039;
3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:针对目前橡胶隔震支座竖向刚度理论公式不能准确计算竖向刚度的问题,建立了经试验验证的精细化 ABAQUS 有限元模型;在此基础上,选取常用几何尺寸(内、外径)、单层橡胶厚度、橡胶层数构造参数矩阵,基于大量有限元分析数据得出了橡胶隔震支座竖向刚度的 BP 神经网络预测模型;最后,基于有限元分析结果对 BP 神经网络模型、中国橡胶隔震支座规范和文献提出的竖向刚度计算公式进行了评估。结果表明:建立的基于内径、外径、单层橡胶厚度和橡胶层数的橡胶隔震支座竖向刚度 BP 神经网络预测模型精度较高;BP 神经网络预测结果与试验结果的相关系数趋近于 1,基于 BP 神经网络对橡胶隔震支座竖向刚度进行计算和预估完全可行;BP 神经网络模型相对于传统拟合方法能更好解决多变量线性耦合关系。

关键词:橡胶隔震支座;竖向刚度;参数化建模;BP 神经网络

中图分类号: TU352.12

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)06-0083-08

Prediction of vertical stiffness of rubber isolation bearings by BP neural network

CHEN Lingyang¹, CUI Langlang², CHEN Yonghui¹, WANG Yuhang³, KE Ke^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. Citic Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471039, Henan, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Aiming at the problem that the vertical stiffness of rubber isolation bearings can not be accurately calculated by the theoretical formula at present, a refined ABAQUS finite element model verified by tests was established. On the basis, the common geometric dimensions (inner and outer diameters), the thickness of single-layer rubber and the number of rubber layers were selected to construct parameter matrices, and the BP neural network prediction model of vertical stiffness of rubber isolation bearings was obtained based on a large quantity of finite element analysis data. Finally, based on the finite element analysis results, the BP neural network model, China's rubber isolation bearing specifications and the vertical stiffness calculation formula proposed in literature were evaluated. The results show that the established BP neural network prediction model of vertical stiffness of rubber isolation bearings based on inner diameter, outer

收稿日期: 2023-01-07

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目(MC-202014-S01)

通信作者: 柯珂(1987-), 男, 工学博士, 研究员, 博士生导师, E-mail: ke.ke@cqu.edu.cn.

diameter, thickness of single rubber layer and number of rubber layers has high accuracy. The correlation coefficient between the predicted results of the BP neural network and the experimental results approaches 1, and it is completely feasible to calculate and estimate the vertical stiffness of rubber isolation bearings based on the BP neural network. The BP neural network model can better solve multivariable linear coupling relationships compared to traditional fitting methods.

Key words: rubber isolation bearing; vertical stiffness; parametric modeling; BP neural network

0 引言

橡胶隔震支座是由橡胶和钢板交替叠合而成, 由于具有构造简单、制作方便和良好的震动隔离性能等优点, 被广泛应用于各类建筑物和机械装置中, 用来减轻振动对结构或机械装置造成的破坏, 降低震后结构、机械装置修复或拆除重建的费用以及对人类生活的影响。近年来橡胶隔震支座的竖向刚度对结构抗震与机械减振性能(如打桩锤)的影响引起了广泛关注。

随着学者对橡胶隔震支座研究的不断深入, 发现现有竖向刚度理论公式^[1-2]计算值与实际值存在偏差。徐永秋等^[3]设计的厚层橡胶隔震支座试验表明其竖向刚度理论值比试验所测结果偏小, 不能简单套用橡胶隔震支座理论计算公式。何文福等^[4]设计制作的橡胶隔震支座竖向刚度试验值与理论值误差较大, 并指出橡胶隔震支座竖向刚度不能单纯依靠理论公式计算, 应该通过试验确定。陈浩文^[5]指出利用规范给出的竖向刚度公式计算厚肉型高阻尼橡胶隔震支座存在较大的误差。Fukasawa 等^[6]设计的橡胶隔震支座竖向刚度试验值与理论值接近, 但是应用存在局限性。

以上研究表明, 利用现有公式确定橡胶隔震支座的竖向刚度, 获取的理论值精度较低, 需进行进一步的研究。刘文光等^[7]提出了基于刚度因子的橡胶隔震支座竖向刚度简化公式, 该公式适用于第一形状系数大于 10 的工程情况。邹立华等^[8]利用回归分析对 Lindley^[9]提出的公式进行修正, 但给出的样本数据较少, 适用范围有限。

以上学者利用曲线拟合的方法主要是最小二乘拟合法、拉格朗日插值法等。由于橡胶隔震支座的竖向刚度往往由多种因素确定, 运用最小二乘法等传统拟合方法拟合效果不佳且公式复杂。神经网络方法具有很高的容错性、自组织和自学习功能, 能很好解决此问题, 且训练好的神经网络还可以对学习样本之外的输入样本进行预测^[10]。

近年来, 神经网络越来越多地应用于工程中解决复杂问题。通常神经网络可以将一组相关的输入参数映射到一组已知的输出值。多层次的具有隐藏层的前馈网络能够提供工程问题非常精确的近似值。到目前为止, 已有学者将神经网络应用于工程抗震领域。刘鸣^[11]利用神经网络建立了多因素对 TRC 加固 RC 柱位移延性系数的预测模型, 预测效果良好, 而且相比于曲线拟合方法, BP 神经网络模型的准确性更高。Horton 等^[12]在无需进行复杂且耗时的全尺寸循环试验或有限元分析的情况下, 使用深度学习网络精确预测减缩梁截面连接的复杂非线性循环滞后行为。

本文运用 ABAQUS 软件建立有限元模型, 对橡胶隔震支座进行静力加载竖向刚度的有限元分析, 通过对比分析相应的试验结果, 验证有限元模型的准确性。利用已验证的有限元模型, 进行了多工况橡胶隔震支座参数化建模, 结合参数化分析结果, 基于橡胶隔震支座内径、外径、单层橡胶厚度、橡胶层数建立橡胶隔震支座竖向刚度的 BP 神经网络预测模型。基于有限元计算结果对本文建立的 BP 神经网络预测模型、中国橡胶隔震支座规范^[13]以及文献^[14]提出的计算公式进行评估。

1 有限元模型建立及验证

1.1 试验数据

设计了中间无开孔的小试件橡胶隔震支座和中间开孔的中试件橡胶隔震支座, 分别见图 1 和图 2。小试件、中试件橡胶隔震支座参数见表 1。本试验采用表 1 所示构造参数制作橡胶隔震支座试件, 小试件每种类型 3 个, 中试件每种类型 4 个。各类型小试件分别在 2 600~2 800 N、3 400~3 800 N、4 600~5 100 N 范围内施加荷载, 各类型中试件分别在压力值为 2、4、6、8、10 MPa 下施加荷载。试验数据将作为论证数值模型有效性的依据, 试验研究不在本文展开讨论。

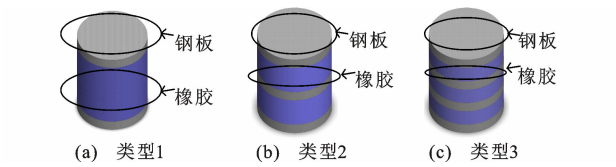


图 1 小试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of small specimens

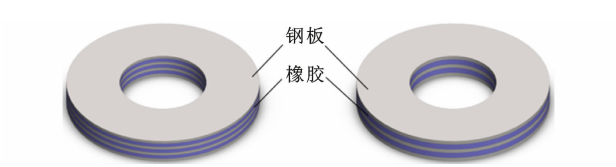


图 2 中试件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of medium specimens

表 1 试件参数

Table 1 Specimen parameters

试件编号	t_r /mm	n /mm	G_r /mm	T_r /mm	D /mm	A /mm ²	S_1	S_2
2S-r-X	27.0	1	4	27	40	1 256	0.37	1.48
3S-2r-X	11.5	2	4	23	40	1 256	0.87	1.74
4S-3r-X	6.3	3	4	19	40	1 256	1.59	1.48
3S-2R-X	12.0	2	8	24	200(90)	400 664	4.58	9.20
4S-3R-X	8.0	3	6	24	200(90)	400 664	6.88	9.20

注:试件编号中 3S 代表 3 层钢板,2r 代表 2 层小试件橡胶,X 代表试件编号,R 代表中试件橡胶; t_r 为单层橡胶厚度; n 为橡胶层数; G_r 为钢板厚度; T_r 为橡胶总厚度; D 为橡胶直径; A 为橡胶截面积; S_1 为第一形状系数; S_2 为第二形状系数。

1.2 有限元模型建立

采用有限元软件 ABAQUS 对所有试件的力学性能进行模拟。钢板材料参数见表 2、3^[15],选用 C3D8R 实体单元模拟。用 Ogden 模型^[16]模拟橡胶材料力学性能,其表达式见公式(1)。

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\lambda_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad \mu_i > 0, \alpha_i > 0 \quad (1)$$

式中: W 为应变能函数; μ_i 、 α_i 为材料参数; λ_i 为伸长率。

本文橡胶材料参数如表 4 所示^[14]。针对橡胶材料的大变形、泊松比约等于 0.5 这一特性,选用 C3D8H 实体单元。钢板与橡胶表面之间的接触关系采用绑定接触,对模型一端以荷载控制方式进行加载,另一端施加固定约束。数值模型见图 3。数值模拟现象与试验现象对比结果见表 5,数值模拟结果与试验结果见图 4。

表 2 金属骨架本构参数

Table 2 Constitutive parameters of metal skeleton

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/10 ⁵ MPa	泊松比
Q355	7 850	2.10	0.3

表 3 金属骨架塑性本构参数

Table 3 Constitutive parameters of metal skeleton plasticity

材料	塑性本构	
	屈服应力/MPa	塑性应变/MPa
Q235	345	0.00
	666	0.01

1.3 计算结果验证

经过对比(表 5、图 4)可知:橡胶隔震支座的变

表 4 橡胶 Ogden 本构参数

Table 4 Ogden constitutive parameters of rubber

i	μ_i	α_i
1	0.630 0	1.3
2	0.001 2	5.0
3	-0.001 0	-2.0

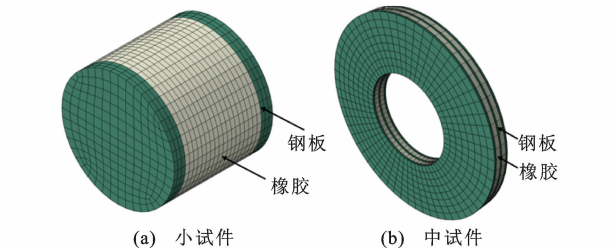


图 3 试件数值模型

Fig. 3 Numerical model of specimen

形模式和竖向刚度有限元模拟结果与试验结果能较好地吻合,误差也在合理范围内,一定程度上证明了本文所选建模方法对橡胶隔震支座竖向刚度模拟的准确性和可靠性。

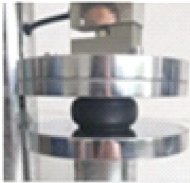

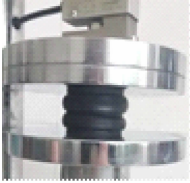
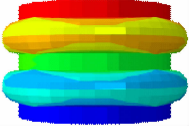
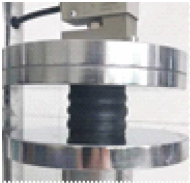
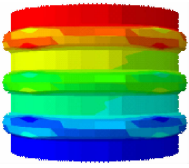

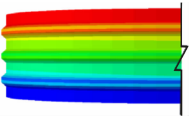

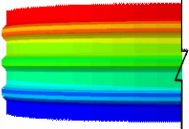
2 参数化建模分析

文献[14]提到,影响橡胶隔震支座竖向刚度的因素有单层橡胶层厚度、橡胶层数、钢板厚度、橡胶支座横截面面积,其中钢板厚度对橡胶隔震支座竖向刚度几乎没有影响。因此,选取单层橡胶层厚、橡胶层数、橡胶支座横截面面积为自变量,其中橡胶支座横截面面积又细分为橡胶支座内径、外径。

前文所进行的缩尺试验已能在一定程度上反映橡胶隔震支座竖向刚度,后文根据中国现行橡胶隔

表 5 试验现象与有限元模拟现象对比

Table 5 Comparison of experimental and finite element phenomena

试件编号	试验现象	有限元模拟现象
2G-r-X		
3G-2r-X		
4G-3r-X		
3G-2R-X		
4G-3R-X		

震支座规范分别选取直径为 500、600、700、800、900、1 000 mm 的橡胶隔震支座,并依据中国规范给定同种类型的橡胶隔震支座橡胶层总厚度,改变单层橡胶厚度和橡胶层数分别建立有限元足尺模型,建筑结构橡胶隔震支座参数化尺寸见表 6。在机械装置(如液压打桩锤)中,橡胶隔震支座与建筑结构抗震橡胶隔震支座构造和工况都相同,故考虑将二者的有限元模型用同一种方法建立。常见的机械装置橡胶隔震支座的尺寸如表 7 所示。给定同种类型的橡胶隔震支座橡胶层总厚度,改变单层橡胶厚度和橡胶层数分别建立有限元足尺模型,打桩锤橡胶隔震支座参数化尺寸见表 7。

按照前文有限元建模方法建立模型,并提取分析结果。共建立有限元模型 180 个,其中建筑橡胶隔震支座和机械装置橡胶隔震支座各 90 个。

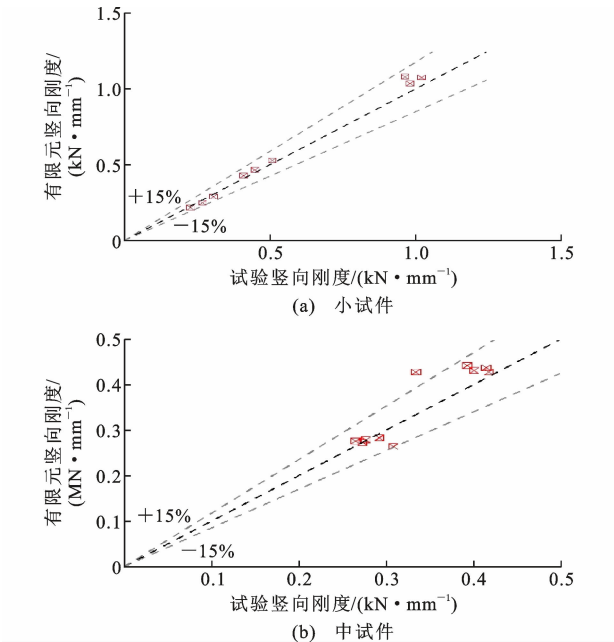


图 4 试验和有限元竖向刚度比较

Fig. 4 Comparison of vertical stiffness between test and finite element

表 6 建筑结构橡胶隔震支座参数化尺寸

Table 6 Parameterized dimensions of rubber isolation bearings for building structures

橡胶隔震支座外径 (内径)/mm	橡胶层数	单层橡胶厚度/mm
500(0), 600(0), 700(0), 800(0), 900(0), 1 000(0)	2 3 ... 15 16	37.5 25.0 ... 5.0 4.7

表 7 机械装置橡胶隔震支座参数化尺寸

Table 7 Parameterized dimensions of rubber isolation bearings for mechanical devices

橡胶隔震支座外径 (内径)/mm	橡胶层数	单层橡胶厚度/mm
600(180), 800(240), 1 000(300), 1 200(360), 1 400(420), 1 600(480)	3 6 ... 45 48	300.0 150.0 ... 20.0 18.8

3 BP 神经网络预测

3.1 BP 神经网络模型的基本原理

BP 神经网络是人工神经网络中应用最广泛的多层误差逆向传播神经网络^[17],由 1 个输入层、若

干隐含层和 1 个输出层确定,层与层之间采用权重连接,同一层之间无连接,BP 神经网络模型的核心步骤如图 5 所示。对于输入训练样本,向前传播得到隐含层,经过激活函数计算后传播到输出层,若输出层得到的结果不满意,则反向传播,调整权重后沿原通路返回,通过不断迭代使误差最小从而得到满意结果。

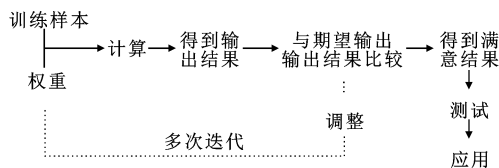


图 5 BP 神经网络核心步骤

Fig. 5 Core steps of BP neural network

激活函数(Sigmoid 函数) $f(x)$ 为

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^x} \quad (2)$$

损失函数 L 为

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [y_i - (wx_i + b)]^2 \quad (3)$$

式中: x_i 为输入值; y_i 为实际输出值; \hat{y}_i 为期望输出值; w 为神经元的连接权值; b 为偏置向量。

BP 算法权重迭代更新可表示为调整量和平滑项之和,即

$$w_{i+1} = w_i \eta \frac{\partial L}{\partial w} + w_i + w_{i+1} \quad (4)$$

式中: η 为网络学习效率; $\eta \frac{\partial L}{\partial w}$ 为学习步长。

3.2 BP 神经网络模型结构设计

本文建立的模型中自变量为 4 个,分别是橡胶隔震支座内径、外径、单层橡胶层厚和橡胶层数,因变量 1 个,为竖向刚度。可确定输入层数为 4 个,输出层数为 1 个。大量研究表明,隐含层层数越多,拟合函数能力越强,效果会越好,但层数过多会带来过拟合的问题。本文通过反复试验法^[18]来确定隐含层层数,最终确定隐含层为 5 个,利用 Levenberg-Marquardt^[19]规则训练网络,BP 神经网络模型示意图如图 6 所示。

为避免因输入层数量级差别而引起较大的网络误差,并保证网络训练时有较好的训练速度和效果,需对输入层数据进行归一化处理,这里采用式(5)所示方法将神经网络输入层和输出层数据规格化,使输入层和输出层每个数据处于 0.1~0.9 之间。

$$\overline{x_k} = 0.8 \left(\frac{x_k - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right) + 0.1 \quad (5)$$

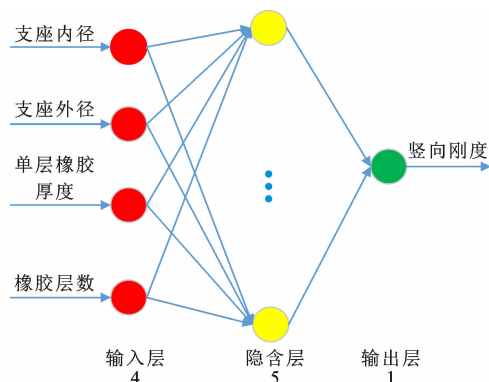


图 6 BP 神经网络结构示意图

Fig. 6 Sketch map of BP neural network framework

式中: $\overline{x_k}$ 、 x_k 、 x_{\min} 、 x_{\max} 分别为归一化值、原始数据、原始数据最大值、原始数据最小值。

3.3 BP 神经网络模型训练

BP 神经网络模型的建立是通过样本的反复训练完成的,本文选用有限元参数化模型中 126 个数据导入 MATLAB。MATLAB 自动将数据分成训练集、验证集和测试集,这 3 个数据集不能重叠。其中训练集用来调试神经网络,验证集用来检验训练效果。在训练时,用训练集数据训练,每训练一次,系统自动将验证集数据传入神经网络验证,在验证集输入后会得出一个误差,系统根据这个误差判断是否停止训练,防止过度拟合。

在训练前对样本数据归一化,设置训练次数为 1 000 次,学习速率为 0.01,训练目标最小误差为 0.000 01。在收敛方面,模型迭代训练次数为 10 左右时,训练停止拟合残差为 0.000 4,说明所选模型在收敛速度方面的效果还是较为明显。

通过样本数据训练过后的 BP 神经网络模型已经具有计算橡胶隔震支座竖向刚度的能力。为验证训练后的 BP 神经网络模型,需要用测试集对模型进行检验,即剩余的 54 个数据用以检验 BP 神经网络模型。结果见图 7~9。

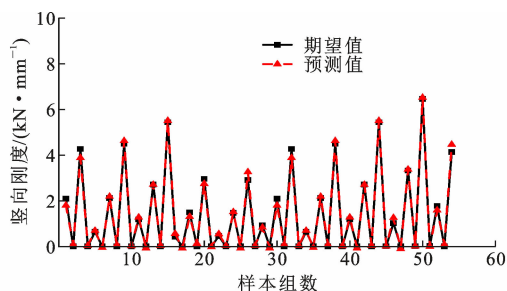


图 7 竖向刚度期望值与预测值比较

Fig. 7 Comparison between expected value and predicted value of vertical stiffness

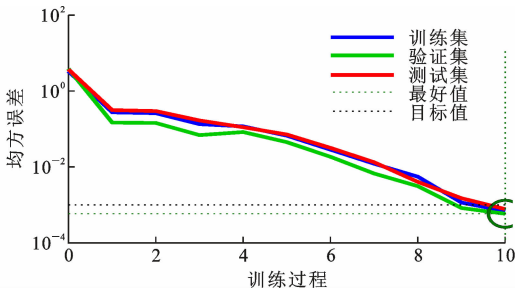


图 8 网络训练过程误差变化图像

Fig. 8 Image of error changes during network training

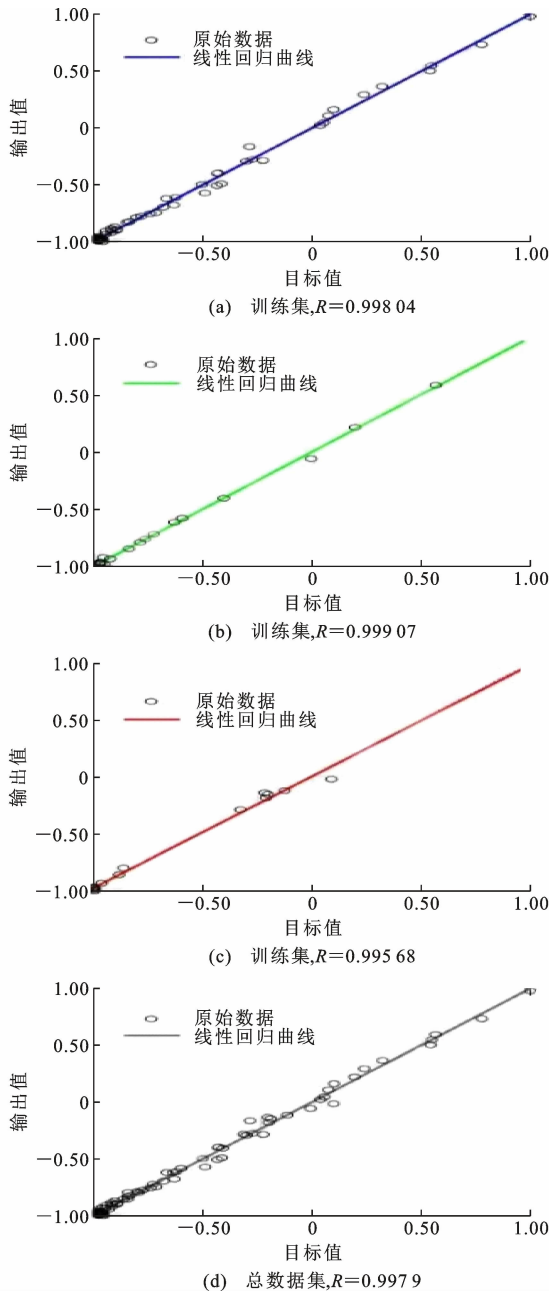


图 9 相关性分析结果

Fig. 9 Correlation analysis results

从图 7 可以看出:预测值与有限元模拟值几乎重合,误差也在较小范围。从图 8 可以看出:目标值为训练精度,最好值为训练集、验证集、测试集训练过程能达到的精度,训练过程中横坐标数值代表迭代次数,可以看出训练后最好值超过目标值,满足要求。从图 9 可以看出测试集和总数据集经训练后的拟合情况,预测结果与有限元结果的相关系数 R 接近于 1,表明输出值与有限元结果误差很小。可见神经网络经过训练后能很好地建立支座内径、外径、单层橡胶厚度、橡胶层数与橡胶隔震支座竖向刚度之间的关系。

4 神经网络模型评估

4.1 规范竖向刚度理论

中国橡胶隔震支座规范^[13]给出了现在较为主流的橡胶隔震支座竖向刚度理论计算公式,它是基于橡胶体非弹性压缩理论建立的。式(6)为实心橡胶隔震支座竖向刚度理论计算公式,式(7)为空心橡胶隔震支座竖向刚度理论计算公式。

$$K_v = \frac{E_{cb}A}{T_R} \quad (6)$$

$$K_v = \frac{E_{cb}A}{T_R A_{ev}} \quad (7)$$

式中: K_v 为橡胶的竖向刚度; T_R 为橡胶层总厚度; A 为橡胶截面面积; A_{ev} 为橡胶所在截面全部面积; E_{cb} 为修正弹性模量。

E_{cb} 计算公式为

$$E_{cb} = \frac{E_c E_b}{E_c + E_b} \quad (8)$$

式中: E_c 为压缩时的弹性模量, $E_c = 3G(1 + \kappa S_1^2)$, G 为剪切弹性模量, κ 为修正系数, S_1 为第一形状系数; E_b 为体积弹性模量,约为 1 960 MPa。

橡胶材料的剪切弹性模量 G 主要取决于橡胶的材料硬度 H (图 10),橡胶种类及成分对其没有显著的影响。在一定范围内,剪切弹性模量 G 与材料硬度的关系为^[19]

$$G = 0.117e^{0.03H} \quad (9)$$

修正系数 κ 与天然橡胶材料剪切弹性模量 G 关系的近似曲线解析式为

$$\kappa = 0.979\ 39 + 0.177\ 34G - 1.451\ 6G^2 + 0.867\ 83G^3 \quad (10)$$

4.2 修正的竖向刚度公式

文献[14]基于有限元分析结果和最小二乘法修正了规范给出的竖向刚度计算公式。本文采用文献[14]方法对建立的有限元模型参数值进行拟合,拟

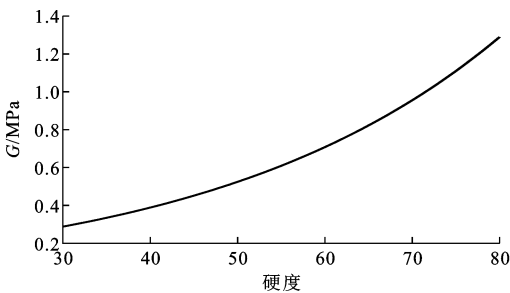


图 10 硬度与剪切模量关系

Fig. 10 Relation between hardness and shear modulus
合结果见式(11)。

$$K_v=\kappa(\frac{t_r}{n})^{-a}\frac{E_{ch}A}{T_R}$$
 (11)

式中: a 为修正系数,需通过实际数据确定,本文 a 取值范围均在 $-1.5\sim-3.8$ 之间;结构支座 κ 取值范围在 $300\sim750$ 之间,打桩锤用支座取值范围在 $10\sim55$ 之间。

4.3 对比分析

分别用已建立的 BP 神经网络模型和根据式(6)、(7)、(11)计算本文用于检验网络模型的 54 个数据,并与有限元模拟值比较,三者的协方差见表 8。

表 8 协方差对比

Table 8 Comparison of covariance

竖向刚度比值	协方差
K_{vBP}/K_{vFEA}	1.62
$K_{vNH'}/K_{vFEA}$	9.76
K_{vNH}/K_{vFEA}	106.07

注: K_{vBP} 为 BP 神经网络模型预测竖向刚度; K_{vFEA} 为有限元方法计算竖向刚度; $K_{vNH'}$ 为文献方法计算竖向刚度; K_{vNH} 为现行规范理论公式计算竖向刚度。

从表 8 可以看出:采用 BP 神经网络模型计算橡胶隔震支座竖向刚度时计算精度最高;文献[14]在规范基础上修正的公式精度高于规范给出的公式。规范公式协方差较大,不能准确计算出橡胶隔震支座的竖向刚度。

5 结 语

(1)橡胶隔震支座内径、外径、单层橡胶厚度和橡胶层数等参数在一定组合情况下,量化了橡胶隔震支座竖向刚度。采用 BP 神经网络进行训练,其预测结果与试验结果的相关系数趋近于 1,基于 BP 神经网络对橡胶隔震支座竖向刚度进行计算和预估是完全可行的。

(2)基于有限元结果,将 BP 神经网络模型与规范公式、文献修正公式进行对比发现,BP 神经网络

模型精度最高,文献修正公式次之,规范给出的橡胶隔震支座竖向刚度计算公式适用范围有限。BP 神经网络模型相对于传统拟合方法能更好地解决多变量线性耦合关系。

(3)需要进一步说明的是,本文仅研究了支座内径、外径、单层橡胶厚度、橡胶层数与橡胶隔震支座竖向刚度 K_v 之间的关系,未考虑橡胶隔震支座的 其他因素对竖向刚度 K_v 的影响,例如水平刚度、剪切刚度等因素对橡胶隔震支座竖向刚度的影响,后期有必要对这些因素开展研究。

参考文献:

References:

[1] 建筑隔震橡胶支座:JG 118—2000[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
Rubber isolation bearings for buildings:JG 118—2000 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.

[2] 肖 畅,盛 涛,金红亮. 橡胶隔震支座竖向刚度有限元模拟与试验研究[J]. 空间结构,2019,25(3):67-71.
XIAO Chang,SHENG Tao,JIN Hongliang. Finite element simulation and experimental study on vertical stiffness of rubber isolation bearings [J]. Spatial Structures,2019,25(3):67-71.

[3] 徐永秋,刘文光. 厚层橡胶隔震支座的竖向力学性能与试验分析[J]. 浙江建筑,2008,25(6):30-32.
XU Yongqiu, LIU Wenguang. Vertical mechanical property and experimental analysis of thick bedded rubber vibration isolation bearing[J]. Zhejiang Construction,2008,25(6):30-32.

[4] 何文福,刘文光,杨彦飞,等. 厚层橡胶隔震支座基本力学性能试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2011,12(3):258-263.
HE Wenfu,LIU Wenguang,YANG Yanfei,et al. Basic mechanical properties of thick rubber isolators[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition),2011,12(3):258-263.

[5] 陈浩文. 厚肉型橡胶隔振支座在地铁周边建筑物隔振中的应用[D]. 北京:清华大学,2014.
CHEN Haowen. Application of thick rubber bearing in vibration isolation for metro surrounding building structures[D]. Beijing:Tsinghua University,2014.

[6] FUKASAWA T,OKAMURA S,YAMAMOTO T, et al. Development on rubber bearings for sodium-cooled fast reactor:part 2 — fundamental characteristics of half-scale rubber bearings based on static test

- [C]//ASME. Proceedings of ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, Boston: ASME, 2015: 1-10.
- [7] 刘文光, 三山刚史, 冯德民, 等. 橡胶隔震支座竖向刚度简化算法[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(4): 111-116.
- LIU Wenguang, MIYAMA Takafumi, FENG Demin, et al. A Simple method for computing vertical stiffness of rubber bearings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(4): 111-116.
- [8] 邹立华, 饶宇, 黄凯, 等. 预应力厚层橡胶支座隔震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(2): 76-82.
- ZOU Lihua, RAO Yu, HUANG Kai, et al. Research on isolating property of prestressed thick rubber bearings[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2): 76-82.
- [9] LINDLEY P B. Natural rubber structural bearings [C]//American Concrete Institute. Joint Sealing and Bearing System for Concrete Structures. Detroit: American Concrete Institute, 1981: 353-378.
- [10] 王奕可, 谢壮宁, 黄用军. 矩形平面超高层建筑横风向气动力谱的神经网络预测[J]. 振动工程学报, 2023, 36(2): 326-333.
- WANG Yike, XIE Zhuangning, HUANG Yongjun. Neural network prediction of across-wind aerodynamic spectrum of rectangular plane super high-rise buildings[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(2): 326-333.
- [11] 刘鸣. TRC 加固 RC 柱抗震性能的有限元分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- LIU Ming. Finite element analysis of seismic performance of RC columns strengthened with TRC[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [12] HORTON T A, HAJIRASOULIHA I, DAVISON B, et al. Accurate prediction of cyclic hysteresis behaviour of RBS connections using Deep Learning Neural Networks[J]. Engineering Structures, 2021, 247: 113156.
- [13] 橡胶支座 第 3 部分: 建筑隔震橡胶支座: GB 20688. 3—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- Rubber bearing — Part 3: elastomeric seismic-protection isolators for buildings: GB 20688. 3—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [14] 王靖雯. 厚叠层橡胶隔震支座力学性能研究及稳定性分析[D]. 广州: 广州大学, 2020.
- WANG Jingwen. Research on mechanical performance and stability analysis of thick laminated rubber bearing[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020.
- [15] Dassault Systemes. ABAQUS 6. 12 analysis users manual volume IIE[M]. Paris: Dassault Systemes, 2012.
- [16] 王小莉. 橡胶隔振器多轴疲劳寿命预测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- WANG Xiaoli. Studies on life prediction of multiaxial fatigue for rubber isolators[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [17] SOZEN A, ARCAKLOGLU E, OZALP M, et al. Forecasting based on neural network approach of solar potential in Turkey[J]. Renewable Energy, 2005, 30(7): 1075-1090.
- [18] KERMANSHAHI B. Recurrent neural network for forecasting next 10 years loads of nine Japanese utilities[J]. Neurocomputing, 1998, 23(1/2/3): 125-133.
- [19] HAGAN M T, MENHAJ M B. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994, 5(6): 989-993.