

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221209002

基于神经网络的跨越地裂缝框架结构地震损伤及预测研究*

熊仲明^{1,2,3}, 熊俊龙^{1,2,3}, 王泽坤⁴, 陈轩^{1,2,3}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 陕西省结构与抗震重点实验室, 陕西 西安 710055; 4. 西北政法大学基建处, 陕西 西安 710122)

摘要: 为开展特殊地质环境下结构的损伤分析, 以一跨越西安 f₄ 地裂缝的五层框架结构为研究对象, 基于振动台试验和 ABAQUS 有限元分析结果, 进行了 BP 神经网络模型的模型训练, 选取变形和能量组合形式的双参数损伤模型计算结构损伤指标, 采用加权系数法, 开展了构件、楼层、结构三个层面的损伤预测分析, 给出了不同地震作用下结构损伤程度评估。结果表明: 地裂缝场地结构表现出明显上下盘效应, 结构首层为薄弱层。BP 神经网络损伤预测值与有限元计算值在不同工况下均较为一致, 其对于构件、层间、整体结构损伤指数预测最大误差分别为 8.86%、5.66%、7.57%, 该研究成果为跨越地裂缝结构的性能评估提供一种准确且高效的研究方法。

关键词: 地裂缝; 框架结构; 数值分析; 神经网络; 损伤预测

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0362-10

Seismic Damage Analysis of Frame Structures Spanning Ground Fissures Based on Neural Network

XIONG Zhongming^{1,2,3}, XIONG Junlong^{1,2,3}, WANG Zekun⁴, CHEN Xuan^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education, Xi'an 710055, China;

3. Shaanxi Key Lab of Structure and Earthquake Resistance, Xi'an 710055, China;

4. Department of Capital Construction, Northwest University of Political Science and Law, Xi'an 710122, China)

Abstract: To carry out structural damage analysis on structures under special geological conditions, a five-story frame structure spanning the f₄ ground fissure in Xi'an was taken as the research object. Based on the results from shaking table tests and ABAQUS finite element analysis, a BP neural network model was trained. A two-parameter damage model combining deformation and energy was employed to calculate structural damage index. The weighted coefficient method was used to carry out the damage prediction analysis of components, floors, and structures, providing evaluations of structural damage under different seismic impacts. The results showed that the structure on the ground fissure site exhibited a significant hanging-wall/footwall effect, with the first layer being the weak layer. The BP neural network's damage prediction values closely aligned with the finite element calculation

* 收稿日期: 2022-12-09; 修回日期: 2023-01-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51278395)、陕西省自然科学基金重点项目(2022JZ-23)资助

作者简介: 熊仲明(1966—), 男, 教授, 博士。主要从事结构抗震和防灾减灾研究。E-mail: xiongzhmgh@xauat.edu.cn

通讯作者: 熊俊龙(1997—), 男, 硕士。主要从事结构抗震研究。E-mail: xiongjunlongxauat@163.com

values across different conditions. The maximum prediction errors for components, inter-layer, and overall structural damage indices were 8.86%, 5.66%, and 7.57%, respectively.

Keywords: ground fissure; frame structure; numerical analysis; neural networks; damage prediction

0 引言

西安是遭受地裂缝灾害最为严重的城市之一,由于地裂缝的作用,造成大量房屋、道路、文物古迹等设施的破坏,截止2006年,西安地裂缝已经造成经济损失达117亿元^[1-2]。随着城市的不断发展,城市用地日益宝贵,在建或已建的建筑难以避免处在裂缝带环境内。因此,在高烈度区地裂缝环境中,对既有跨越地裂缝建筑结构的健康状况进行预测评估,为跨越地裂缝建筑结构抗震设计提供参考,预测建筑结构损伤发展情况、排除隐患并制订有效的加固措施,进一步减少经济损失。

目前,国内外学者针对地裂缝场地结构抗震性能开展了大量研究,主要是通过振动台试验并结合有限元分析^[3-5],但目前试验方法费用昂贵,试验也只能表征初始状态和最终状态,中间过程无法得知。即使具备做试验的条件,在试验过程中,受到设备和经费的限制,不能按实际结构进行试验,需要对试验模型按照一定比例进行缩尺,将会产生尺寸效应,导致结构的损伤最终结果存在偏差;如果只做有限元分析,有限元模型需要进行验证、求解,所花费的时间较长。如何对结构损伤进行快速判定和具体定位,是目前地裂缝场地结构灾害控制急需解决的关键问题。

近年来,国内外学者将神经网络技术运用到结构的损伤检测。J. N. Kudva等^[6]将神经网络技术应用于平板结构并提出大型结构损伤检测方法。J. W. Lee等^[7]充分考虑了有限元模型的训练样本参数误差对于神经网络预测结果影响,提出了基于神经网络和模态特征的损伤检测方法。王柏生等^[8]通过改进单一输入参数进行结构损伤识别,结果表明组合参数作为输入参数具有良好的识别能力。姜绍飞等^[9]分别用传统概率神经网络和自适应概率神经网络进行悬索桥的损伤定位分析。O. R. De Loutour等^[10]提出利用人工神经网络来预测地震所引起结构损伤。熊仲明等^[11]利用神经网络算法进行大跨结构缺陷损伤诊断,结果表明将大跨结构划分为若干子结构,能有效提高缺陷判断的精度和收敛速

度。S. M. Vazirizade等^[12]利用神经网络技术进行结构损伤定位和量化,并得到了结构失效概率。上述研究表明,神经网络技术在结构的损伤定位和损伤识别方面应用较广,具有良好的容错性、鲁棒性和联想能力。

综上所述,不难看出国内外针对结构的损伤检测的研究起源较早,发展比较成熟,但对于特殊地质条件下结构的研究尚有不足,特别是针对地裂缝场地条件下结构的损伤研究更为少见。因此,本文以跨西安₁地裂缝(丈八路—幸福北路地裂缝)的五层框架结构为研究对象,通过数值模拟进行结构损伤分析,同时应用BP神经网络技术进行构件、楼层、结构三个层面的损伤预测,分析跨地裂缝结构的损伤规律,并建立不同峰值加速度下结构损伤状态变化曲线,以便达到对损伤的快速判定和准确预测的目的。

1 结构损伤模型

国内外相关规范通常采取最大层间位移角作为结构损伤的判别依据。但层间位移的判别不能说明结构产生同等位移时所需往复次数的影响。目前,工程界一致认为结构地震损伤由变形和耗能的联合因素引起。Y. J. Park等^[13-14]基于大量构件分析,提出了钢筋混凝土构件的双参数损伤模型,即Park-Ang损伤模型,该模型考虑了变形和能量两方面,反映了地震动三要素对结构的损伤破坏影响,但也存在着模型离散性较大,且不易收敛等问题。同时, Park-Ang模型属于线性组合,缺乏理论依据。

为准确反映钢筋混凝土结构的损伤水平,并缩小模型的离散性和解决上下界不收敛问题,本文参考陈林之等^[15]提出的修正Park-Ang损伤模型,其表达式为:

$$D = (1 - \beta) \frac{x_m}{x_{cu}} + \beta \frac{E_h}{F_y(x_{cu} - x_y)} \quad (1)$$

式中, $F_y(x_{cu} - x_y)$ 表示混凝土构件在单调加载至破坏过程中的耗能,扣除了弹性变形的影响; β 为组合系数,参照文献[15]前期试算取0.1。

由于整体结构的损伤评价一般通过结构整体的力学性能改变所实现,并未考虑局部构件损伤对结构整体的影响。为此本文采用欧进萍等^[16]提出的同时考虑结构薄弱层损伤值和楼层序列影响的加权系数法。其加权系数 W_j 为:

$$W_j = \frac{(n+1-i)D_j}{\sum_{j=1}^n (n+1-j)D_j} \quad (2)$$

式中, D_j 为 j 层的损伤指数; W_j 为 j 层的权重系数; n 为结构的总层数。

基于上述双参数损伤模型,采用加权组合法得到整体结构损伤值。并将损伤状态与损伤指数的区间相对应^[16],结果见表1。

表1 结构震害等级对应损伤指数范围^[16]

Table 1 Damage index ranges for different seismic damage grades^[16]

震害等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
损伤指数	$D < 0.2$	$0.2 \leq D < 0.4$	$0.4 \leq D < 0.6$	$0.6 \leq D < 0.9$	$D \geq 0.9$

2 工程概况及有限元模型建立

2.1 工程概况

试验模型以一跨越西安 f₁ 地裂缝的五层办公楼为研究对象,结构层高均为 3.6 m;结构纵向长度 18 m,横向宽度 15.6 m,总高 21 m 中部为 2.4 m 宽的走廊,结构跨越西安 f₄ 地裂缝(丈八路—幸福北路地裂缝),采用柱下独立基础,结构平面布置如图 1 所示。其中,建筑场地类别为 II 类,设计地震分组为第一组,框架结构抗震等级为二级。

2.2 有限元模型建立

采用 ABAQUS 软件建立跨地裂缝框架结构-土共同作用的有限元模型,如图 2 所示。梁、柱采用线性梁单元 B31,楼板采用 S4R 四边形壳单元,混凝土中的梁、柱钢筋采用添加命令流的方式定义。模型土体采用 C3D8R 三维实体单元,地裂缝场地土体尺寸长度、宽度和深度取为 180、22.5、22.5 m,土体单元网格的尺寸取 1.5 m。上部框架和土体之间采用节点耦合方式进行约束,不同土层之间不设约束,允许传递力和变形。地裂缝倾角为 80°,采用接触面

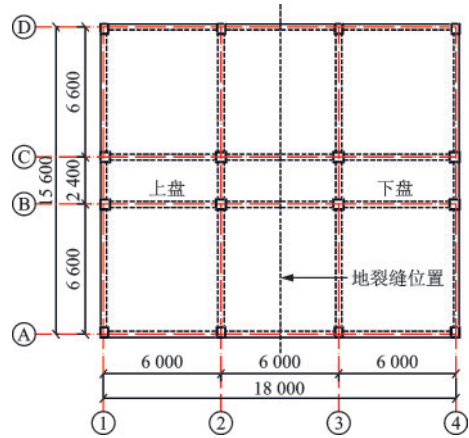


图1 结构平面布置

Fig.1 Frame structure plan layout

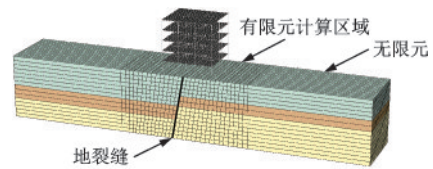


图2 三维有限元模型

Fig.2 Three-dimensional finite element model

来模拟上盘与下盘的相互作用,故定义切向作用为罚摩擦,罚摩擦系数取 0.3,法向接触为硬接触^[17]。

为减小地震波在边界处的反射和散射效应,通过在有限域土体两侧设置无限元边界模拟有限区域的人工边界^[18]。混凝土本构模型为 UConcrete02,该本构模型能够考虑抗拉强度及损伤退化;钢筋本构模型选用理想弹塑性模型;土体本构选择 Mohr-Coulomb(摩尔库伦)模型,该本构能较好反映土体的塑性变形特性,且土体参数较少,应用比较广泛。

2.3 有限元模型验证

课题组前期已经完成振动台试验^[19]。通过对比输入峰值加速度 0.4g 的 El-Centro 波作用下上部结构的最大加速度、层间位移试验结果与模拟结果来验证有限元模型的可行性,结果如图 3 所示。

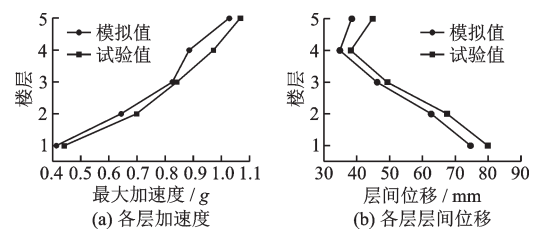


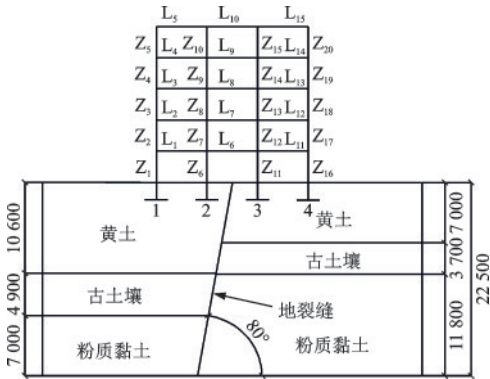
图3 试验与模拟对比

Fig.3 Comparison between test and simulation results

由图3可知试验结果和有限元分析结果吻合较好,实验值和模拟值加速的最大误差为5.74%、层间位移的最大误差为8.65%。模拟结果与试验情况表现出较好的趋势一致性,这表明跨越地裂缝结构数值模拟模型是有效的,具有较好的可靠性。

2.4 计算模型与工况

为便于分析结构构件损伤,以一榀框架跨地裂缝纵向边框架进行研究,分别对所选框架梁、柱进行编号,具体标号如图4所示,其中1、2轴位于地裂缝上盘,3、4轴位于地裂缝下盘。在模型底部水平方向分级输入峰值加速度分别为:0.05g、0.1g、1.5g、0.2g、0.3g、0.4g和0.6g的江油波、El-Centro波和基岩波进行有限元模拟。



数整体大于框架柱,说明框架梁较框架柱破坏程度大,符合“强柱弱梁”的破坏形态。

将有限元计算得到的层间最大位移和层间耗能

通过损伤模型计算得到楼层损伤指数见表2。由表中结果可知,结构层间损伤指数在首层最大,随着层高的增加结构损伤逐渐减小,在四层到五层出现拐点。

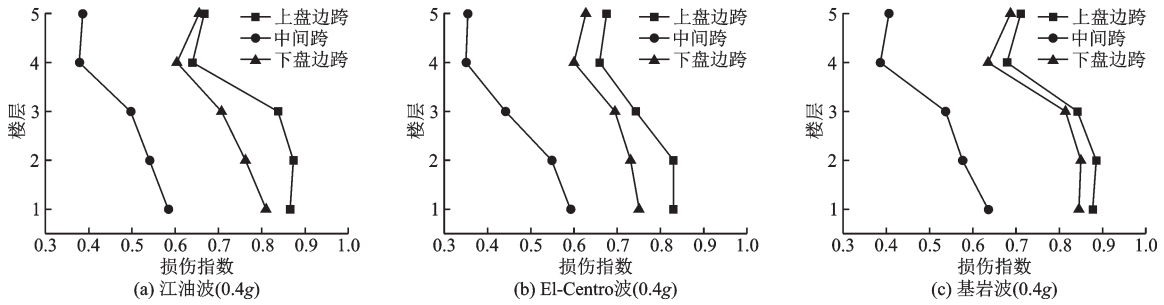


图6 梁的损伤指数

Fig.6 Damage indices of beams

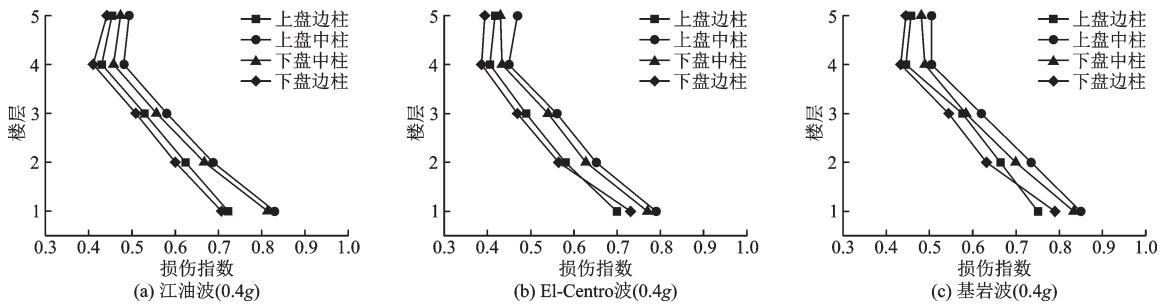


图7 柱的损伤指数

Fig.7 Damage indices of columns

表2 楼层损伤指数

Table 2 Damage indices of floors

楼层	加载等级/g	江油波	El-Centro波	基岩波	楼层	加载等级/g	江油波	El-Centro波	基岩波
5	0.05	0.120	0.043	0.053	5	0.1	0.129	0.106	0.130
4	0.05	0.111	0.038	0.053	4	0.1	0.127	0.100	0.122
3	0.05	0.139	0.064	0.134	3	0.1	0.164	0.155	0.176
2	0.05	0.171	0.093	0.152	2	0.1	0.213	0.183	0.227
1	0.05	0.205	0.124	0.172	1	0.1	0.235	0.233	0.253
5	0.15	0.207	0.192	0.267	5	0.2	0.320	0.267	0.342
4	0.15	0.170	0.169	0.220	4	0.2	0.284	0.265	0.307
3	0.15	0.306	0.244	0.310	3	0.2	0.397	0.370	0.408
2	0.15	0.324	0.305	0.358	2	0.2	0.471	0.422	0.492
1	0.15	0.385	0.374	0.416	1	0.2	0.510	0.483	0.538
5	0.3	0.421	0.359	0.408	5	0.4	0.624	0.533	0.599
4	0.3	0.368	0.326	0.381	4	0.4	0.551	0.474	0.546
3	0.3	0.518	0.526	0.561	3	0.4	0.626	0.587	0.710
2	0.3	0.621	0.565	0.658	2	0.4	0.809	0.786	0.839
1	0.3	0.691	0.606	0.769	1	0.4	0.982	0.905	0.997

3.3 BP神经网络预测模型验证

通过振动台试验结果选取各级地震波下上部结构最大层间位移、层间剪力,以原型结构峰值加

速度0.05g~0.4g六个加载等级进行BP神经网络训练。采用神经网络预测模型预测峰值加速度0.6g时El-Centro波下结构层间位移、层间剪力,并与试验结果对比,结果如图8所示。

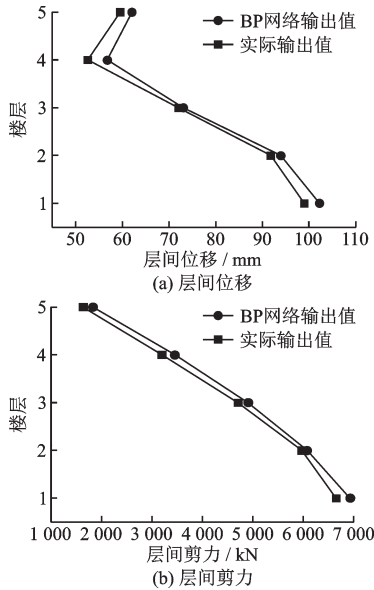


图8 有限元与试验结果对比

Fig.8 Comparison between finite element and test results

由图8可知,在BP神经网络模型中,在峰值加速度为0.6g El-Centro波下预测结果与试验数据接近且趋势相同,其中层间位移预测值的平均相对误差绝对值为5.71%,BP算法对于层间剪力预测值的平均相对误差绝对值为5.98%,BP神经

网络算法预测值与试验结果吻合度较好,进而验证了所建立的BP神经网络模型的正确性和可行性。

3.4 跨地裂缝结构损伤预测

基于有限元计算结果,运用BP神经网络算法进行构件损伤预测时,以已知的加载等级和梁、柱构件恢复力曲线参数作为训练输入集,以构件的变形和耗能及各构件损伤指数值作为训练输出集,进行需求峰值加速度下梁、柱构件的损伤预测。采用梯度下降算法,将数据进行归一化处理,并添加1%的正态分布噪声,训练模型抗噪能力;最大训练次数为50 000次;网络期望误差平方和设置为0.006 5;网络学习速率设置为0.035;隐含层采用Sigmoid函数。

将0.1g~0.3g三种地震波作用下框架结构构件的参数作为训练集数据,进行BP神经网络预测模型训练,用以预测峰值加速度为0.4g时构件的位移及耗能。根据预测值与有限元模拟值最终绘制出不同地震波作用下各柱的位移及耗能曲线,如图9、10所示。

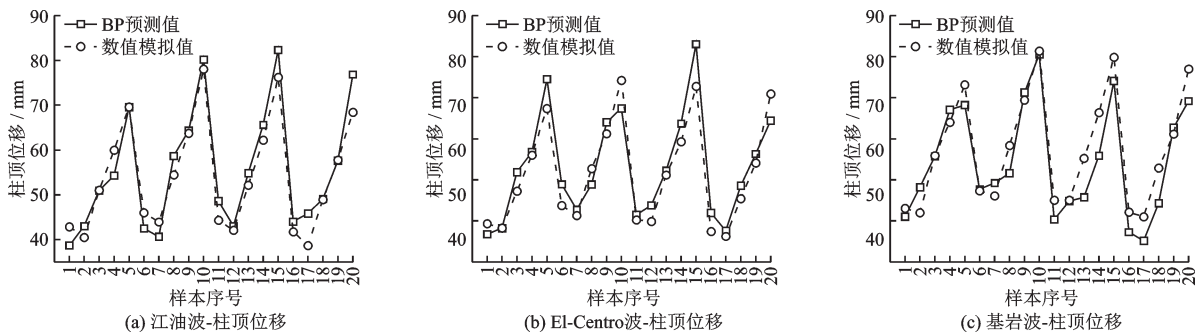


图9 数值模拟与BP预测位移值曲线

Fig.9 Curves of displacement values: numerical simulation vs. BP prediction

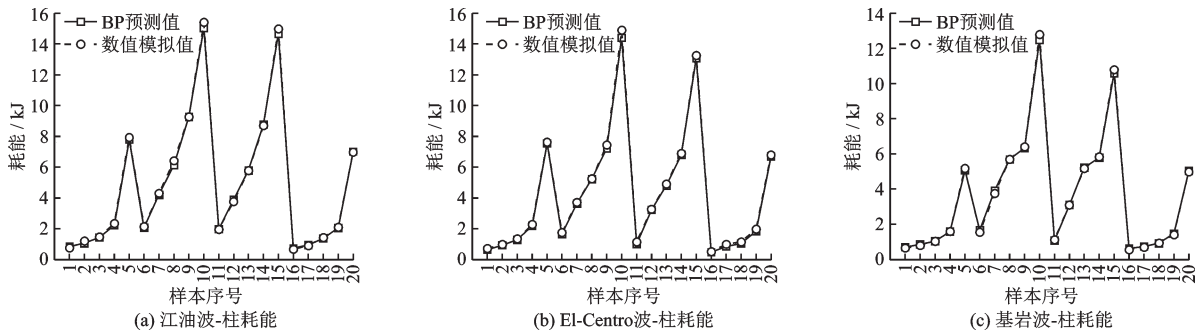


图10 数值模拟与BP预测耗能误差值曲线

Fig.10 Curves of energy consumption errors: numerical simulation vs. BP prediction

通过比较三种地震波作用下BP神经网络预测值和数值模拟值的相对误差(表3)。在三种地震波作用下BP算法预测20个柱的柱顶位移平均相对误差绝对值最大为7.98%;耗能的平均相对误差绝对值最大为3.45%。这说明训练得到的预测结果均具有较高的置信水平。BP神经网络在网络训练、识别精度和抗噪能力上表现较好。

表3 平均相对误差绝对值

Table 3 Average absolute relative errors

	平均相对误差绝对值		
	江油波	El-Centro波	基岩波
位移	5.97	6.85	7.98
耗能	2.76	3.45	3.30

单位:%

将构件的位移及耗能值输入修正的Park-Ang模型,得到如图11、12所示梁、柱构件损伤预测值,在三种地震波作用下,梁、柱构件预测损伤指数均能呈现与数值模拟较一致的变化规律。即同层框架梁上盘损伤指数最大、其次是下盘、中间跨损伤指数最小,框架柱损伤指数上盘中柱大于下盘中柱,基本满足地裂缝上、下盘规则。沿结构层高方向,框架柱损伤大致呈现

出逐渐减小趋势,其中结构一层构件破坏最为严重。

分别对比峰值加速度为0.4g三种地震波作用下经数值模拟及神经网络方法预测得到梁、柱损伤参数的相对误差,BP神经网络算法预测梁的最大平均相对误差绝对值为8.86%,框架柱的最大平均相对误差绝对值为6.74%,BP神经网络预测结果与有限元计算结果吻合度较好。

进行层间损伤指数预测时,以0.05g~0.3g三种地震波作用下的结构层间损伤指数作为训练集数据,进行模型训练。随后将训练好的神经网络模型,按照与构件预测相同的方法,以加载等级和楼层恢复力参数作为训练输入级,楼层层间最大位移和耗能及各楼层的损伤指数作为训练输出集,进行层间损伤指数预测。再将楼层的损伤指数预测结果按照加权系数法计算得到整体结构损伤指数。其中,BP神经网络预测0.4g三种地震波下层间损伤指数及加权得到的结构损伤指数结果见表4。由表中结果可知,BP神经网络在三种地震动作用下层间损伤预测结果均表现出在结构首层损伤最大,随着层高的增加损伤逐渐减小,同时在四层到五层出现拐点。三种地震动作用下结构层间损伤指数在有限元计算及BP神经网络预测下的平均相对误差绝对值为5.66%、4.84%、4.04%。

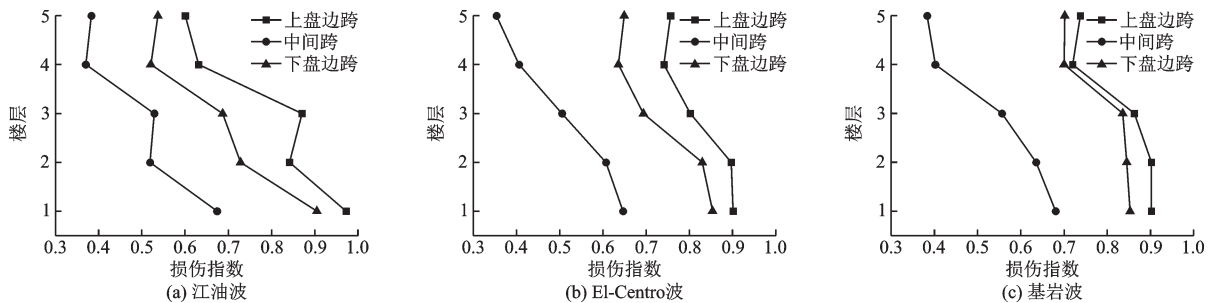


图11 梁的预测损伤指数

Fig.11 Predicted damage indices of beams

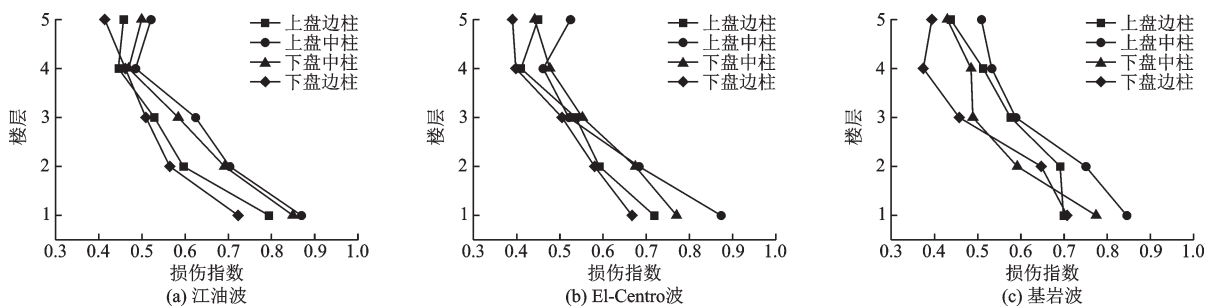


图12 柱的预测损伤指数

Fig.12 Predicted damage indices of columns

表4 神经网络预测结果

Table 4 Neural network prediction results

地震波	楼层	x_m/mm	E_n/J	D_i	w	D
江油波	5	45.325	286 512.187	0.537	0.049	
	4	42.791	358 670.158	0.524	0.096	
	3	54.763	406 434.875	0.639	0.175	0.752
	2	65.082	485 864.317	0.754	0.276	
	1	77.576	632 939.771	0.881	0.403	
El-Centro波	5	42.990	271 106.990	0.509	0.049	
	4	40.576	322 609.312	0.494	0.095	
	3	54.071	396 885.163	0.630	0.183	0.712
	2	60.400	490 271.130	0.707	0.273	
	1	73.073	591 431.176	0.829	0.400	
基岩波	5	48.254	279 670.260	0.566	0.050	
	4	46.646	304 206.558	0.554	0.097	
	3	59.317	383 473.539	0.682	0.179	0.784
	2	70.025	457 813.817	0.799	0.280	
	1	81.049	560 609.050	0.904	0.395	

将0.05g~0.3g训练后的层间损伤指数加权得到整体结构损伤指数,并与0.4g下得到的预测损伤指数一同绘制得到三种地震波作用下整体结构训练及预测损伤指数如图13所示,将有限元计算所得到的层间损伤加权得到整体结构的损伤曲线如图14所示。由图13、14整体结构损伤指数可知,当峰值加速度为0.05g和0.1g时,整体结构损伤指数基本小于0.2,结构处于基本完好状态。当峰值加速度达0.15g时,损伤指数位于0.2~0.4内,结构处于轻微破坏状态。当峰值加速度达0.2g时,结构处于中等破坏状态。当峰值加速度达0.3g时,El-Centro波作用时,结构处于中等破坏状态,基岩波作用时,结构已处于严重破坏状态。当峰值加速度达0.4g时,三种地震波作用下损伤指数均大于0.6,结构处于严重破坏状态。神经网络预测结果能有效地反映整体结构在不同地震作用下的损伤情况。

综上所述,通过有限元计算结果与神经网络算法结果对比可知,三种地震波作用下训练及预测损伤指数与计算结果趋势相同。BP神经网络预测模型在三种不同地震波作用下平均相对误差绝对值分别为7.57%、6.50%、6.39%,均能够很好地刻画出整体损伤指数。根据损伤状态与损伤指数的区间划分可知,训练及预测损伤指数与有限元计算结果在相同峰值加速度下的破坏程度位于同一区间

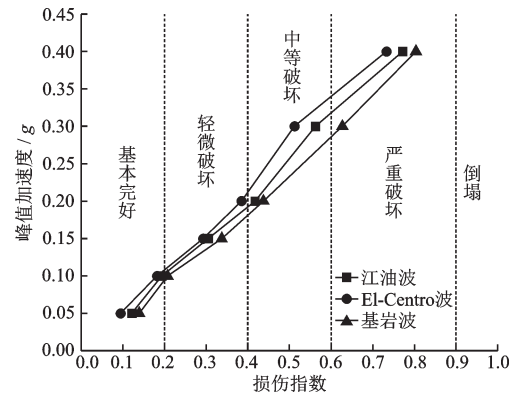


图13 神经网络预测结构损伤指数曲线

Fig.13 Neural network predicted curves for structural damage indices

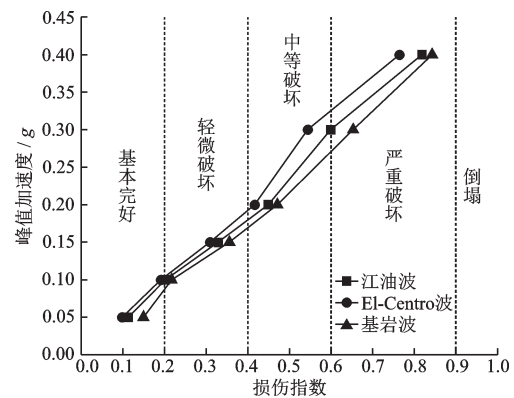


图14 数值模拟结构损伤指数曲线

Fig.14 Finite element simulation curves for structural damage indices

内,说明BP神经网络预测方法可行,训练及预测得到的损伤指数结果可靠。

4 结论

(1)基于BP神经网络算法的地裂缝场地结构损伤预测具有较高的准确性。对于框架梁、柱损伤最大误差分别为6.74%、8.86%,层间损伤的预测最大误差为5.66%,对于整体结构预测最大误差为7.57%,说明BP神经网络能够有效地对地裂缝场地框架结构进行损伤预测。

(2)梁、柱构件损伤指数呈现出明显的上下盘规律。同层框架梁、柱上盘损伤指数大于下盘,框架柱损伤指数中柱大于边柱。框架梁的损伤指数整体大于框架柱,其中结构一层构件破坏最为严重。

(3)结构底层层间损伤在结构首层损伤最大,

随着层高的增加,损伤逐渐减小,同时在四层到五层出现拐点;结构整体损伤预测值与数值模拟结果在相同峰值加速度下均位于同一损伤状态区间内,进一步验证了BP神经网络结构损伤预测方法针对地裂缝场地结构的准确性。

参考文献:

- [1] 张家明. 西安地裂缝研究[M]. 西安: 西北大学出版社, 1990.
Zhang J M. Research on ground fissures in Xi'an City [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1990. (in Chinese)
- [2] 阎文中. 西安地裂缝与地面沉降灾害经济损失评估[J]. 上海地质, 2010, 31(1): 32-37.
Yan W Z. Evaluation on disaster economic losses of Xi'an ground[J]. Shanghai Geology, 2010, 31(1): 32-37. (in Chinese)
- [3] Liu N, Huang Q, Ma Y, et al. Experimental study of a segmented metro tunnel in a ground fissure area [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 100: 410-416.
- [4] 熊仲明, 韦俊, 郭亚雷, 等. 非一致性地震作用下跨越地裂缝结构的动力响应研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4): 197-202.
Xiong Z M, Wei J, Guo Y L, et al. A study on the dynamic response of structures across ground fissures under non-uniform seismic [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(4): 197-202. (in Chinese)
- [5] 慕焕东, 邓亚虹, 常江, 等. 西安地裂缝场地动力响应规律振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增1): 3139-3149.
Mu H D, Deng Y H, Chang J, et al. Shaking table model test study on dynamic response of Xi'an ground fissure site [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39 (Sup1): 3139-3149. (in Chinese)
- [6] Kudva J N, Munir N, Tan P W. Damage detection in smart structures using neural networks and finite-element analyses [J]. Smart Materials and Structures, 1992, 1(2): 108.
- [7] Lee J W, Yi J H, Kim J D, et al. Health monitoring method using committee of neural networks [J]. Key Engineering Materials, 2004, 270: 1983-1988.
- [8] 王柏生, 倪一清, 高赞明. 框架结构连接损伤识别神经网络输入参数的确定[J]. 振动工程学报, 2000, 13(1): 141-146.
Wang B S, Ni Y Q, Gao Z M. Input parameters for artificial neural networks in frame connection damage identification [J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(1): 137-142. (in Chinese)
- [9] 姜绍飞, 刘明, 倪一清, 等. 大跨悬索桥损伤定位的自适应概率神经网络研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(8): 74-78.
Jiang S F, Liu M, Ni Y Q, et al. Research on adaptive probabilistic neural network for damage localization of a long-span suspension bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(8): 74-78. (in Chinese)
- [10] De Lautour O R, Omenzetter P. Prediction of seismic-induced structural damage using artificial neural networks [J]. Engineering Structures, 2009, 31 (2): 600-606.
- [11] 熊仲明, 王超, 林涛. 基于神经网络的大跨钢结构缺陷损伤的定位研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(9): 191-196.
Xiong Z M, Wang C, Lin T. Defect determination of large-span steel structure based on neural network [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(9): 191-196. (in Chinese)
- [12] Vazirizade S M, Nozhati S, Zadeh M A. Seismic reliability assessment of structures using artificial neural network [J]. Journal of Building Engineering, 2017, 11: 230-235.
- [13] Park Y J, Ang A H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722-739.
- [14] Park Y J, Ang A H S, Wen Y K. Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 740-757.
- [15] 陈林之, 蒋欢军, 吕西林. 修正的钢筋混凝土结构Park-Ang损伤模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 1103-1107.
Chen L Z, Jiang H J, Lyu X L. Modified Park-Ang damage model for reinforced concrete structures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2010, 38(8): 1103-1107. (in Chinese)
- [16] 欧进萍, 何政, 吴斌, 等. 钢筋混凝土结构基于地震损伤性能的设计[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(1): 21-30.
Ou J P, He Z, Wu B, et al. Seismic damage performance based design of reinforced concrete structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1999, 19(1): 21-30. (in Chinese)

