

文章编号:1673-2049(2016)01-0099-07

# 考虑楼板刚度贡献的梁柱节点半刚性连接 弯矩-转角神经网络模型

刘 坚<sup>1</sup>, 潘 澎<sup>2</sup>, 李东伦<sup>1</sup>, 周观根<sup>3</sup>, 于志伟<sup>1</sup>, 陈 原<sup>1</sup>

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 梧州市城乡建设规划设计院, 广西 梧州 543002;  
3. 浙江东南网架股份有限公司, 浙江 杭州 311209)

**摘要:**首先对已有钢结构梁柱节点半刚性连接弯矩-转角经典模型存在的不足进行了述评;然后采用非线性有限元方法对有无楼板刚度贡献的外伸端板半刚性连接节点进行了非线性仿真分析,把获得的这种节点半刚性连接弯矩-转角关系与常用梁柱节点半刚性连接弯矩-转角经典模型进行了对比分析;最后运用神经网络智能算法,首次提出了考虑楼板刚度影响的十参数梁柱节点外伸端板半刚性连接智能模型。研究表明:楼板的存在增大了梁柱节点刚度,减少了节点相对转动,使得实际工程中存在楼板刚度影响的半刚性连接弯矩-转角关系与现有半刚性连接弯矩-转角模型计算得到的弯矩-转角关系存在着较大误差;提出的十参数半刚性连接弯矩-转角神经网络模型能较好地模拟这种节点实际受力和变形情况;提出的智能模型具有较高精度和计算效率,同时也具有可靠性、有效性和实用性。研究结果可为考虑楼板刚度贡献的其他半刚性连接形式的弯矩-转角关系的进一步研究以及在实际工程中的应用提供参考。

**关键词:**楼板刚度;外伸端板;半刚性梁柱节点;弯矩-转角;神经网络;仿真分析

**中图分类号:**TU392.4 **文献标志码:**A

## Neural Network Model of Moment-rotation Relation in Semi-rigid Beam-column Joints Considering Floor Stiffness

LIU Jian<sup>1</sup>, PAN Peng<sup>2</sup>, LI Dong-lun<sup>1</sup>, ZHOU Guan-gen<sup>3</sup>, YU Zhi-wei<sup>1</sup>, CHEN Yuan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China;  
2. Wuzhou Institute of Urban Planning and Design, Wuzhou 543002, Guangxi, China;  
3. Zhejiang Southeast Space Frame Co., Ltd, Hangzhou 311209, Zhejiang, China)

**Abstract:** The shortage of existing classic moment-rotation model which was semi-rigid connections of beam-column joints for steel structure was reviewed. The nonlinear simulation analysis of semi-rigid joints for end-plate steel structure with floor stiffness and without floor stiffness were carried out using nonlinear finite element method, and the moment-rotation relation in semi-rigid joints was compared with that in semi-rigid classic moment-rotation model. Finally, based on the neural network intelligent algorithm, the ten parameters neural network model which considered the effect of floor stiffness was established. The study results show that the floor can increase the stiffness of the beam-column joints, and reduce the relative rotation of joints which makes the curves for semi-rigid joints in practical engineering has large error with the

收稿日期:2015-08-05

基金项目:广东省教育厅科技创新项目(2012-KJ CX-0084);住房和城乡建设部科技计划项目(2012-k2-8);

浙江东南网架股份有限公司项目(SM-0716-01)

作者简介:刘 坚(1964-),男,湖南高沙人,教授,工学博士,博士后,E-mail:787196372@qq.com。

existing classic semi-rigid joint model; the neural network model of semi-rigid joints for steel structure with floor stiffness effect can simulate the reality loading and transformation performance of semi-rigid beam-column joints; the neural network model has higher precision and computational efficiency, reliability, validity and practicability. The obtained results can provide references for the further study in other semi-rigid connections with floor stiffness and application in practical engineering.

**Key words:** floor stiffness; extended end-plate; semi-rigid beam-column joint; moment-rotation; neural network; simulation analysis

## 0 引言

随着钢产量的逐年增加和国家政策的鼓励,钢结构已经成为中国高层建筑中常用的形式之一<sup>[1]</sup>,梁柱外伸端板连接是钢结构工程中半刚性连接比较常见的一种<sup>[2]</sup>,目前,各国学者对端板式连接节点的抗震性能展开了深入的研究<sup>[3-7]</sup>,节点半刚性降低了横梁对柱子的约束刚度,节点耗能能力得到增强,有利于抗震。文献[8]研究表明,端板连接半刚性节点具有较大的抗弯承载力和转动刚度。文献[9]研究表明,有限元分析能较好地模拟此类节点的转动能力和刚度变化。文献[10]对梁柱节点端板连接破坏模式及弯矩-转角关系进行了研究,提出一种弯矩-转角关系的数学模型。由于实际工程中楼板刚度贡献对于钢结构梁柱节点性能的影响较大,会改变梁柱节点的受力性能,另一方面,已有经典的弯矩-转角模型基本上没有考虑楼板刚度影响<sup>[2]</sup>,因此能较好地反映半刚性连接实际受力和变形特点的弯矩-转角模型还需进一步研究。

神经网络是由多个神经元组成的广泛互连的网络,是一种非线性处理单元,能够模拟生物神经系统真实世界以及物体之间所做出的交互反应。目前已有众多学者应用神经网络对土木工程领域的问题进行了研究<sup>[11-16]</sup>。文献[17]采用神经网络对混凝土框架节点的抗震性能进行了研究,研究结果表明,神经网络可以同时考虑多个影响因素对其进行仿真预测分析。文献[18]运用 BP(Back Propagation)神经网络对墩柱的抗震性能进行了评估,分析结果表明,BP 神经网络训练样本具有很好的容错性和预测性能。文献[2]基于神经网络对几种不考虑楼板刚度影响的半刚性节点连接的弯矩-转角模型进行了研究,分析结果表明,神经网络能很好地模拟半刚性连接弯矩-转角关系。

梁柱节点外伸端板半刚性连接是一种具有较大刚度的半刚性连接,而且具有一定的耗能能力,可以

较大程度地提高结构在地震下的可靠性。本文首先对现有梁柱节点半刚性连接的弯矩-转角模型进行评述;然后运用非线性有限元方法,对带楼板的外伸端板半刚性连接梁柱节点进行大量仿真分析,从而获得这种节点半刚性连接弯矩-转角关系,与现有钢结构梁柱节点半刚性连接弯矩-转角经典模型进行分析对比;最后基于 BP 神经网络智能算法,提出十参数考虑楼板刚度贡献的梁柱节点外伸端板半刚性连接弯矩-转角神经网络模型。为考虑楼板影响的梁柱节点其他类型半刚性连接弯矩-转角关系的进一步研究以及在钢结构工程中的应用提供参考,特别是为这种节点的拟静力试验打下基础。

## 1 现有经典钢结构梁柱节点半刚性连接弯矩-转角模型存在的不足

目前各国对梁柱节点半刚性连接研究主要集中在静力、动力性能试验与仿真分析方面<sup>[19]</sup>,梁柱节点半刚性连接弯矩-转角模型<sup>[2,20]</sup>主要有线性模型、多项式模型、B3 样条函数模型、三参数幂函数模型、指数函数模型、EC3 模型(欧洲钢结构规范),其不足方面如下:①由于梁柱节点半刚性连接弯矩-转角性能基本上是非线性的,采用线性模型对梁柱节点半刚性连接精确分析不合适,可以用在简化计算中;②由于多项式函数的复杂性,多项式模型一阶导数可能出现负数,造成刚度不连续或负刚度;③B3 样条函数模型的项数较多,需要输入大量的试验数据,使用不方便;④三参数幂函数模型没有考虑钢材的强化性能,只适合理想弹塑性材料;⑤当曲线出现斜率变化较大时,指数函数模型会出现跳跃点,导致曲线的不连续;⑥ EC3 模型对下降段不能较好地模拟。

综上所述,目前梁柱节点半刚性连接弯矩-转角模型都存在一定的缺陷和适用范围,而且都不考虑楼板刚度的贡献,与梁柱节点的实际情况不符,因此有必要对梁柱节点半刚性连接弯矩-转角模型开展

进一步研究。

## 2 有无楼板梁柱节点半刚性连接弯矩-转角关系的仿真分析

采用非线性有限元方法,对考虑与不考虑楼板刚度贡献的梁柱节点外伸端板半刚性连接弯矩-转角关系进行了大量的非线性仿真分析。仿真分析中梁柱外伸端板半刚性连接节点[S-1 节点和 SF- $i$ ( $i=1\sim 8$ ) 节点]设计符合《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)<sup>[21]</sup> 和《钢结构设计规程》(DBJ 15-102—2014)<sup>[22]</sup> 的要求,钢材为 Q345,弹性模量为  $2.06\times 10^5$  MPa,其中 S-1 节点[图 1(a)]的梁截面尺寸为  $250\text{ mm}\times 125\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 9\text{ mm}$ ,长度为  $1\,200\text{ mm}$ ;柱截面尺寸为  $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ ,长度为  $1\,800\text{ mm}$ ;螺栓的屈服强度为  $940\text{ MPa}$ ,弹性模量为  $2.06\times 10^5$  MPa。

SF- $i$  节点[图 1(b)]是在 S-1 节点[图 1(a)]的基础上增加了压型钢板与混凝土组合楼板,压型钢板型号为 YX70-200-600,Q235 钢材,混凝土强度等级为 C30,泊松比取  $0.2$ ,弹性模量取  $3.25\times 10^4$  MPa。

为了对考虑与不考虑楼板刚度贡献的梁柱节点外伸端板半刚性连接弯矩-转角关系进行非线性仿真分析,使用非线性有限元软件 ABAQUS 进行建模。非线性仿真分析中,钢柱与外伸端板的摩擦因数取  $0.4$ ,钢梁与外伸端板、螺帽与外伸端板、螺帽与型钢柱、螺杆与孔壁均采用 Tie 绑定。梁、柱、外伸端板、螺栓与加劲肋的计算单元均采用三维实体单元 C3D8R。为节省篇幅,以下仅给出 S-1 和 SF-7 节点的对比分析结果。

图 2 为 SF- $i$  节点分析结果。S-1 节点和 SF-7 节点的仿真分析结果与现有半刚性连接弯矩-转角模型计算结果的对比见图 3。从图 3 可以看出,S-1 节点与三参数幂函数模型和 EC3 模型弯矩-转角关系在弹性状态基本吻合,但在钢材进入塑性状态后,其弯矩-转角关系存在一定误差。

SF-7 节点与现有的双线性模型、多项式模型、三参数幂函数模型和 EC3 模型的弯矩-转角关系存在较大误差,由于楼板刚度贡献,楼板、梁和柱成为一个整体协同工作,因此节点的初始刚度增大;同时随着荷载的不断施加,SF-7 节点的极限承载力也与幂函数模型、EC3 模型的弯矩-转角关系存在较大的差别。

综上所述,现有的双线性模型、多项式模型、三

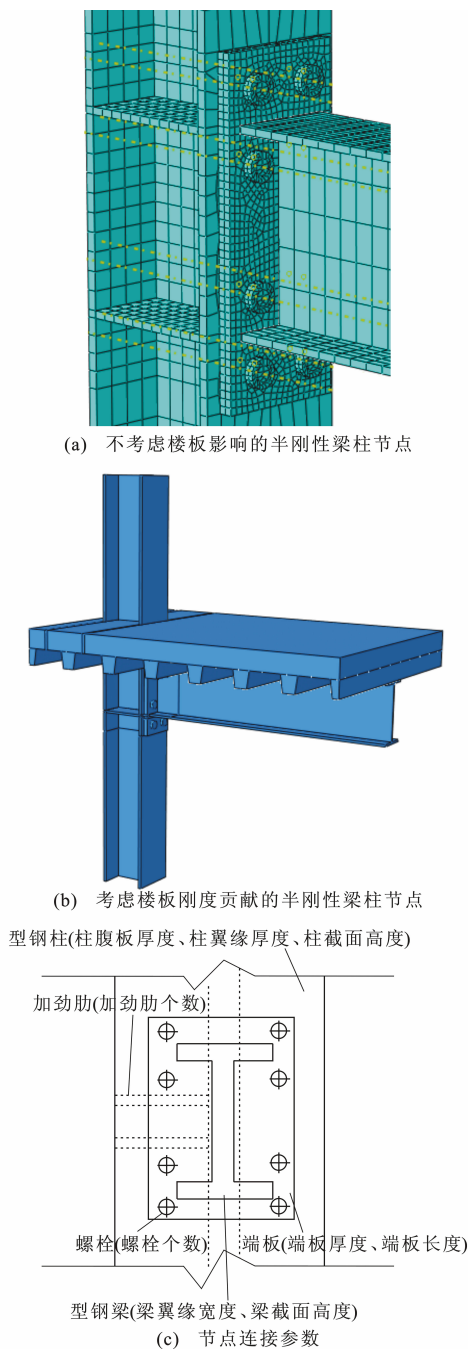


图 1 S-1 节点和 SF- $i$  节点

Fig. 1 Joints S-1 and SF- $i$

参数幂函数模型和 EC3 模型为不考虑楼板的刚度贡献而得出的弯矩-转角关系,不能反映半刚性连接受力和变形的实际情况。对考虑楼板刚度影响的梁柱节点半刚性连接的弯矩-转角关系进行模拟并不适用,因此对考虑楼板作用的梁柱节点半刚性连接弯矩-转角模型需进行进一步研究。

## 3 BP 神经网络模型的建立

本文采用 BP 神经网络来建立十参数考虑楼板

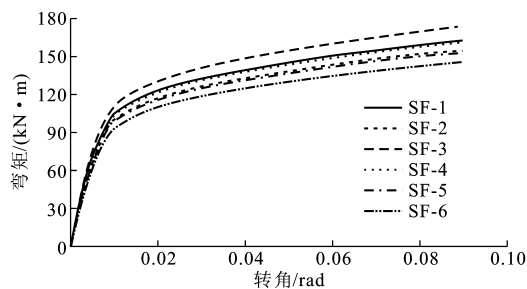


图 2 SF-*i* 节点分析结果

Fig. 2 Analysis Results of Joints SF-*i*

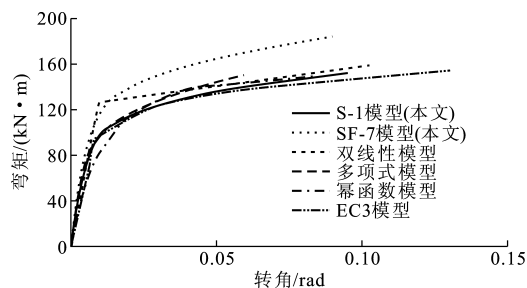


图 3 非线性仿真分析结果与现有弯矩-转角模型计算结果比较

Fig. 3 Comparison Between Nonlinear Simulation Analysis Results and Existing Moment-rotation Model Calculation Results

刚度贡献的梁柱节点外伸端板半刚性连接弯矩-转角神经网络模型,采用具有 1 个输入层、1 个输出层和 1 个隐含层的 BP 神经网络。

BP 神经网络是近年发展起来的一种数学模型,其运作机制类似于人体内神经元之间信息传递处理的网络运行模式,是众多神经网络中应用最广泛的一种。作为一种人工智能方法,可以通过映射功能来建立起函数对应关系。BP 神经网络优点主要表现在:可以定量或定性储存信息,能够同时处理定量和定性信息;具有联想存储功能和强大的容错性;可以充分逼近任意复杂的非线性关系;具有学习功能和自适应功能;具有并行处理能力;具有高速寻求最优解的能力,可以快速大量运算。

BP 神经网络是基于误差反向传播算法的训练网络。训练学习过程由信号的正向传播与误差的逆向传播 2 个过程组成,正向传播时,模式作用于输入层,经隐藏层处理后,传入误差的逆向传播过程,将输出误差按照某种子形式通过隐藏层向输入层逐层返回,并反馈给各层的所有单元,从而获得各层单元的误差信号,以作为修改各单元权值的依据,其不断修正权值的过程就是 BP 神经网络训练学习过程(图 4)。

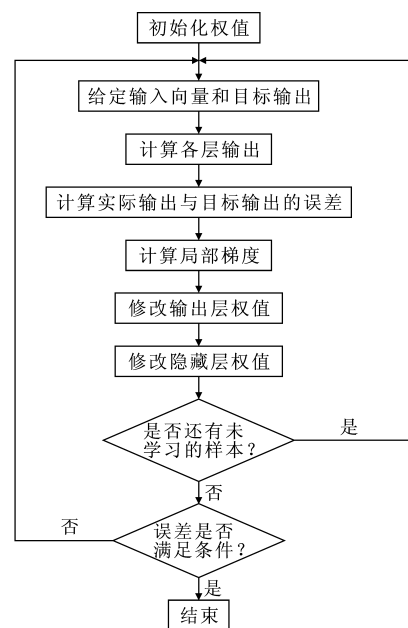


图 4 BP 神经网络训练学习过程

Fig. 4 Training and Learning Process of BP Neural Network

## 4 基于 BP 神经网络梁柱节点端板半刚性连接弯矩-转角智能模型

### 4.1 参数设计

本文 BP 神经网络模型主要由网络层数、每层节点数、传递函数、输出函数和学习算法等几个方面确定。首先建立网络(函数 newff);其次对网络初始化(函数 init);然后进行网络训练(函数 train);最后进行网络仿真预测分析(函数 sim)。

为了建立考虑楼板刚度贡献的梁柱节点端板半刚性连接弯矩-转角 BP 神经网络模型,需要把连接参数与仿真分析得到的弯矩-转角关系数据作为 BP 神经网络模型训练的学习样本。

在文献[2]的研究基础上,提出了十参数考虑楼板刚度贡献的梁柱节点外伸端板半刚性连接弯矩-转角 BP 神经网络模型。在采用相同材料的情况下,通过大量分析,最后确定梁柱节点端板半刚性连接弯矩-转角神经网络模型的 10 个训练输入连接参数分别为柱腹板厚度、柱翼缘厚度、柱截面高度、端板厚度、加劲肋个数、端板螺栓数目、梁翼缘宽度、端板长度、梁截面高度和楼板厚度。节点训练样本的连接参数见表 1。

### 4.2 模型的建立

调用 net 命令建立 BP 神经网络,其命令为  
net=newff(*p*,*t*,[*S*<sub>1</sub>,*S*<sub>2</sub>,*⋯*,*S*<sub>*n*</sub>],{*TF*<sub>1</sub>,  
*TF*<sub>2</sub>,*⋯*,*TF*<sub>*n*</sub>},*BTF*)

表 1 训练样本的连接参数

Tab. 1 Connection Parameters of Training Samples

节点编号	柱腹板厚度/mm	柱翼缘厚度/mm	柱截面高度/mm	端板厚度/mm	加劲肋个数	端板螺栓个数	梁翼缘宽度/mm	端板长度/mm	梁截面高度/mm	楼板厚度/mm
SF-1	8	12	200	18	4	8	9	450	250	100
SF-2	8	12	200	18	4	8	9	450	250	80
SF-3	8	12	200	18	2	8	9	450	250	150
SF-4	8	12	200	18	2	8	9	450	250	120
SF-5	8	12	200	18	2	8	9	450	250	100
SF-6	8	12	200	18	2	8	9	450	250	80

式中: $p$  为输入向量,包含节点连接参数和弯矩-转角关系; $t$  为目标矩阵,包含弯矩-转角关系; $S_1, S_2, \dots, S_n$  为第  $n$  层网络中神经元的个数,本文网络层数为 3 层,每层网络神经元个数为 50 个; $TF_1, TF_2, \dots, TF_n$  为各层神经元采用的传递函数,输出层为 logsig 函数,中间层为 tansig 函数;BTF 为神经网络分析训练时所采用的函数,本文采用 trainbr 函数。

设置训练步数为 5 000 步。训练目标误差为  $1 \times 10^{-9}$ ,训练学习效率为 0.1,训练结果间距步数为 1 000 步,该半刚性连接弯矩-转角 BP 神经网络模型流程见图 5。

4.3 例证分析

BP 神经网络建立后,对表 2 中的 SF-7 节点进行训练,得到 SF-7 节点弯矩-转角关系预测结果(图 6),训练次数达到 34 次时结束,网络训练误差小于  $1 \times 10^{-9}$ ,计算收敛,神经网络训练停止。从图 6 可以看出,BP 神经网络模型与非线性有限元仿真分析结果吻合较好。

对表 2 中的 SF-8 节点进行训练,得到 SF-8 节点弯矩-转角关系预测结果(图 7),训练次数达到 29 次时结束,网络训练误差小于  $1 \times 10^{-9}$ ,计算收敛,神经网络训练停止。从图 7 可以看出,BP 神经网络模型与非线性有限元仿真分析结果吻合较好。

5 结 语

(1)为了反映半刚性连接节点的实际受力和变形特点,采用非线性有限元方法,对考虑与不考虑楼板刚度贡献的端板半刚性连接梁柱节点进行了大量仿真分析,从而得到这种节点的半刚性连接弯矩-转角关系,并与现有的双线性模型、多项式模型、B3 样条函数模型、三参数幂函数模型、EC3 模型和指数函数模型的计算结果进行了对比分析。分析表明,不考虑楼板刚度贡献的半刚性连接弯矩-转角关系不能反映这种节点半刚性连接实际受力和变形特点。现有半刚性连接弯矩-转角经典模型只适用于不考虑楼板刚度贡献的梁柱节点半刚性连接设计,因为钢结构实际工程中梁柱与楼板已形成了一个整体节点,因此实际钢结构工程中梁柱节点比不考虑楼板刚度贡献的节点半刚性连接的初始转动刚度大,抗弯承载能力更强。

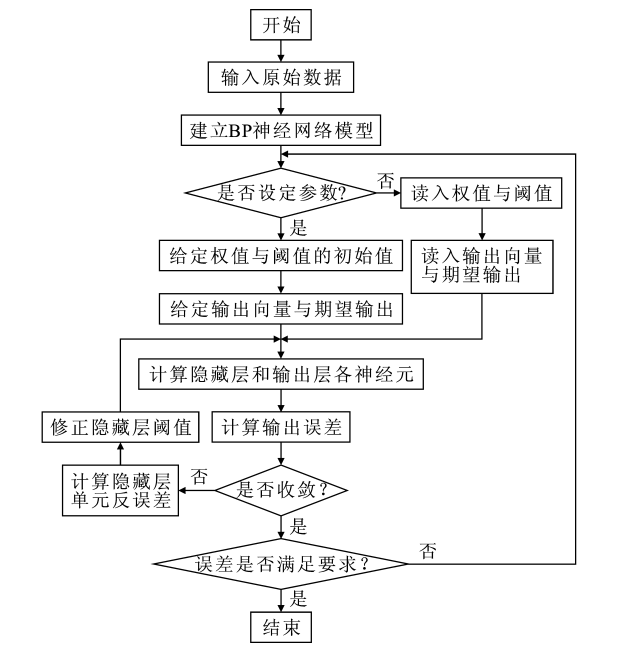


图 5 BP 神经网络模型的流程

Fig. 5 Flow of BP Neural Network Model

表 2 检验样本的连接参数

Tab. 2 Connection Parameters of Testing Samples

节点编号	柱腹板厚度/mm	柱翼缘厚度/mm	柱截面高度/mm	端板厚度/mm	加劲肋个数	端板螺栓个数	梁翼缘宽度/mm	端板长度/mm	梁截面高度/mm	楼板厚度/mm
SF-7	8	12	200	18	4	8	9	450	250	150
SF-8	8	12	200	18	4	8	9	450	250	120

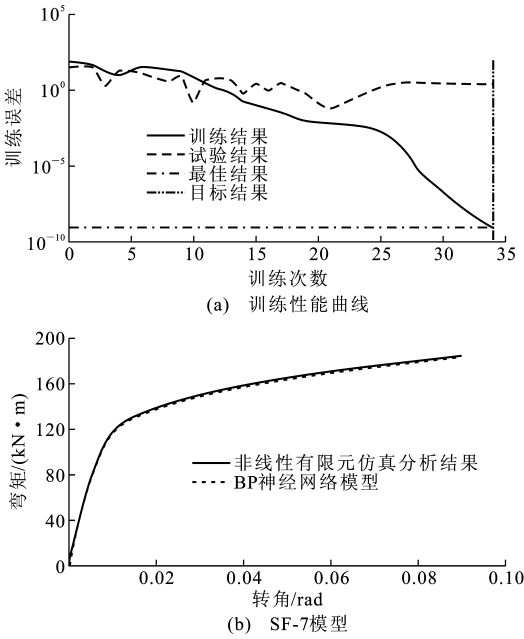


图 6 SF-7 节点的神经网络训练与预测结果  
Fig. 6 Neural Network Training and Prediction  
Results of Joint SF-7

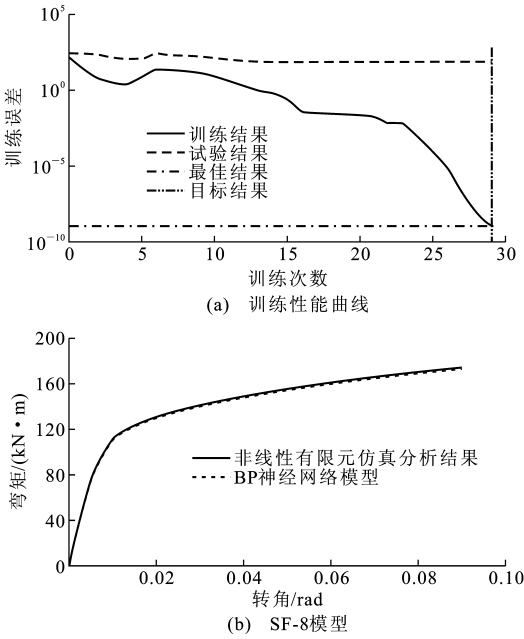


图 7 SF-8 节点的神经网络训练与预测结果  
Fig. 7 Neural Network Training and Prediction  
Results of Joint SF-8

(2) 基于 BP 神经网络智能算法,首次建立了十参数考虑楼板刚度贡献的梁柱节点外伸端板半刚性连接弯矩-转角 BP 神经网络模型。该神经网络模型中 10 个连接参数分别为柱腹板厚度、柱翼缘厚度、柱截面高度、端板厚度、加劲肋个数、端板螺栓数目、梁翼缘宽度、端板长度、梁截面高度和楼板厚度。该模型的提出为今后考虑楼板刚度影响的梁柱节点

其他半刚性连接类型的弯矩-转角模型的进一步研究以及工程应用提供参考,特别是为这种节点拟静力试验打下基础。

(3) 大量分析表明,提出的半刚性连接弯矩-转角 BP 神经网络模型可以迅速地对弯矩-转角关系进行模拟和预测,其预测结果与非线性有限元仿真分析结果吻合较好,预测精度较高,同时也表明该模型具有可靠性、有效性和实用性。

参考文献:

References:

[1] 刘 坚. 钢与混凝土组合结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2005  
LIU Jian. Design Principle for Steel and Concrete Composite Structures [M]. Beijing: Science Press, 2005.

[2] 刘 坚. 钢结构高等分析的二阶非线性理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
LIU Jian. Second Order Inelastic Theory and Application for Advanced Analysis of Steel Structure [M]. Beijing: Science Press, 2012.

[3] 施 刚, 石永久, 李少甫, 等. 多层钢框架半刚性端板连接的循环荷载试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 74-93.  
SHI Gang, SHI Yong-jiu, LI Shao-fu, et al. Cyclic Tests of Semirigid End-plate Connections in Multi-story Steel Frames [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 74-93.

[4] 王 燕, 彭福明, 赵桂明. 钢框架梁柱半刚性节点在循环荷载作用下的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(12): 55-57.  
WANG Yan, PENG Fu-ming, ZHAO Gui-ming. Experimental Study of Semi-rigid Joint of Steel Frame Beam-column Under Cycle Load [J]. Industrial Construction, 2001, 31(12): 55-57.

[5] GUO B, GU Q, LIU F. Experimental Behavior of Stiffened and Unstiffened End-plate Connections Under Cyclic Loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(9): 1352-1357.

[6] YORGUN C, BAYRAMOGLU G. Cyclic Tests for Welded-plate Sections with End-plate Connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(12): 1309-1320.

[7] BRODERICK B M, THOMSON A W. The Response of Flush End-plate Joints Under Earthquake Loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(9): 1161-1175.

[8] 石永久, 王 萌, 王元清, 等. 钢框架端板连接半刚性

- 节点受力性能分析[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 51-58.
- SHI Yong-jiu, WANG Meng, WANG Yuan-qing, et al. Analysis on the Behavior of Steel Frame End-plate Connections[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 51-58.
- [9] 李国强, 司 洋, 郝坤超. 垫板对平齐式端板连接梁柱节点性能的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(4): 7-13.
- LI Guo-qiang, SI Yang, HAO Kun-chao. Influence of Inserted Plate on Behavior of Flush End-plate Beam-to-column Joints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(4): 7-13.
- [10] 郭 兵, 柳 锋, 顾 强. 梁柱端板连接的破坏模式及弯矩转角关系[J]. 土木工程学报, 2002, 35(5): 24-27.
- GUO Bing, LIU Feng, GU Qiang. Failure Mode and Moment-rotation Relationship for End-plate Beam-column Connections[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(5): 24-27.
- [11] 胡广良, 李思明. 神经网络在结构优化设计中的应用[J]. 工程建设与设计, 2003(6): 16-17.
- HU Guang-liang, LI Si-ming. The Application of Neural Networks in Structural Optimization[J]. Construction & Design Engineering, 2003(6): 16-17.
- [12] 李守巨, 刘迎曦, 吴玉良, 等. 基于神经网络的建筑结构节点损伤识别方法[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(3): 270-273.
- LI Shou-ju, LIU Ying-xi, WU Yu-liang, et al. Damage Identification of Building Structure with LM Artificial Neural Networks[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(3): 270-273.
- [13] 瞿伟廉, 陈 伟. 多层及高层框架结构地震损伤诊断的神经网络方法[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(1): 43-48.
- QU Wei-lian, CHEN Wei. Seismic Damage Diagnosis of Frame Structure Using Artificial Neural Network[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(1): 43-48.
- [14] CAO X, SUGIYAMA Y, MITSUI Y. Application of Artificial Neural Networks to Load Identification[J]. Computers & Structures, 1998, 69(1): 63-78.
- [15] YEN G G. Identification and Control Large Structures Using Neural Networks[J]. Computers & Structures, 1995, 52(5): 859-870.
- [16] GHABOUSI J, JOGHATAIE A. Active Control of Structures Using Neural Networks[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(4): 555-567.
- [17] 白建方. 基于神经网络的钢筋混凝土框架异性节点抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- BAI Jian-fang. Study on Seismic Behavior of Abnormal Joints of Reinforced Concrete Frame Based on Neural Networks[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.
- [18] 冯清海, 袁万城. BP神经网络和RBF神经网络在墩柱抗震性能评估中的比较研究[J]. 结构工程师, 2007, 23(5): 41-47, 69.
- FENG Qing-hai, YUAN Wan-cheng. Comparative Study on BP Neural Network and RBF Neural Network in Performance Evaluation of Seismic Resistance for Pier Columns[J]. Structural Engineers, 2007, 23(5): 41-47, 69.
- [19] 陈颖智, 童乐为, 陈以一. 组件法用于钢结构节点性能分析的研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(3): 81-89.
- CHEN Ying-zhi, TONG Le-wei, CHEN Yi-yi. Research Developments of Component Method for Behavior of Joints in Steel Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(3): 81-89.
- [20] 刘 坚, 周观根, 潘 澎, 等. 钢框架-型钢混凝土剪力墙新型混合结构抗震性能研究[R]. 广州: 广州大学, 2014.
- LIU Jian, ZHOU Guan-gen, PAN Peng, et al. Study on Seismic Performance for Steel Frame-steel Reinforced Concrete Shear Wall New Type Hybrid Structure[R]. Guangzhou: Guangzhou University, 2014.
- [21] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].
- GB 50017—2003, Code for Design of Steel Structures[S].
- [22] DBJ 15-102—2014, 钢结构设计规程[S].
- DBJ 15-102—2014, Specification for Design of Steel Structures[S].