

王东明, 刘欢, 李永佳. 砖混结构废墟救援安全评估 BP 模型研究[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 10–14, 29. [Wang Dong-ming, Liu Huan and Li Yongjia. Research on Security Evaluation BP Model of Brick-concrete Structure Ruins [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(2): 10–14, 29.]

## 砖混结构废墟救援安全评估 BP 模型研究<sup>\*</sup>

王东明<sup>1</sup>, 刘欢<sup>2</sup>, 李永佳<sup>1</sup>

(1. 中国地震灾害防御中心, 北京 100029; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 建筑结构废墟救援安全评估模型可在不浪费大量人力物力的条件下有效地服务于地震灾区应急救援工作。针对历次地震中破坏最为严重的砖混结构建立了废墟救援安全评估模型。根据砖混结构废墟救援安全评估模型的研究现状探究和需求分析, 研究了采用 BP 神经网络模型建立安全评估模型的方法和过程, 分析了安全评估模型影响因素的划分要点和安全等级判定原则, 基于实际救援案例采用 MATLAB 对模型进行了训练, 并对所建立的模型进行了实例验证和算例计算。模型验证和算例计算结果表明所建立的砖混结构废墟安全评估模型可在不需要精确探究结构倒塌机理的基础上直接应用于砖混结构废墟救援的安全评估工作, 且该模型还具有评估结果准确、操作简便, 以及便于工程实际应用的显著特点。

**关键词:** 地震救援; 安全评估; 砖混结构; 废墟; BP 人工神经网络模型

**中图分类号:** X43      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000–811X(2016)02–0010–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2016.02.003

“最大限度地降低地震灾害造成的损失”是我国政府、企业以及个人在震后第一时间投入大量人力进行应急救援的行动方针。在地震应急救援过程中, 如何保障救援人员和被困人员的“双安全”<sup>[1]</sup>是救援队关注的首要问题。而安全有效的地震应急救援工作应以科学合理的建筑结构废墟安全评估工作为“先行军”。因此, 建筑结构废墟安全评估工作是影响地震救援工作成败的重要影响因素之一。

对于建筑结构废墟安全评估工作的研究, 目前主要集中在建筑结构地震破坏模型、震后房屋安全鉴定、地震灾害压埋人员场景分析以及地震灾害人员搜救行动决策等几个方面。如 1991 年, 杜修力等对建筑物地震破坏评估模型进行了研究, 基于建筑结构极限耗能求和法提出了建筑结构地震破坏模型<sup>[2]</sup>; 2003 年, 孙柏涛、王东明对地震现场建筑物安全性鉴定智能辅助系统进行了研究<sup>[3]</sup>, 该安全鉴定系统主要从能否在震后继续使用的角度对震后建筑的安全性等级进行评价, 但并未对建筑结构废墟的安全性等级进行具体的研究; 2009 年, 肖东升基于 GIS 和 CA 技术对地震灾害压埋人员情景等问题进行了研究, 构建了地震

灾害压埋人员情景评估指标体系、设计了能够实现人员动态分布、地震压埋人员分布等功能的分析评估系统<sup>[4]</sup>; 2014 年, 颜冬启研究了地震压埋人员搜救的重点目标快速确定技术, 分析了重点目标地震压埋人员搜救急迫度影响因素<sup>[5]</sup>。但目前都缺乏对地震救援阶段建筑结构废墟安全性评估进行具体和深入的研究。

本文在分析砖混结构废墟救援安全评估模型需求的基础上, 研究了砖混结构废墟救援安全评估模型的建立方法和建立过程。本文的相关研究成果可广泛应用于地震应急救援现场砖混结构废墟救援安全评估工作。

### 1 问题的提出

遭受极其强烈地震动作用后建筑结构倒塌现象普遍存在。在地震现场进行应急救援工作时通常需要派遣具有丰富经验的结构工程专家首先对建筑结构废墟进行安全评估, 然后采取一定的措施快速有效地排除危及救援人员和压埋人员生命

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015–08–17      修回日期: 2015–10–25

基金项目: 地震行业科研专项(201208019); 地震星火计划(XH1034); 国家自然科学基金(51208479)

作者简介: 王东明(1977–), 男, 辽宁大连人, 博士, 研究员, 主要从事结构抗震、应急救援、震害仿真、震害预测等研究。

E-mail: zf\_wdm@163.com

安全的障碍,最后指导施救人员深入结构废墟内部进行压埋人员救援工作。这种地震应急救援工作模式适用于救援范围较小、结构工程专家数量充裕的情况。但实际情况却是我国地震现场应急救援经验丰富的结构工程专家数量极其有限,而且当遭遇地震灾区面积极为广大,通讯闭塞,交通出现障碍等情况时,分布在全国各地的结构工程救援专家很难能够及时到达工作现场或通过远程控制实施救援指导。

建筑结构废墟安全评估模型可以在没有救援专家在场的情况下,科学合理地给出建筑结构废墟安全状态评估结果和应急救援处置措施建议。但目前关于建筑结构震后倒塌机理以及倒塌规律的研究结果尚不明确,因此当前不可能根据现有的震害资料直接建立一个物理意义明确、数学映射关系精确、计算结果准确的震后建筑结构废墟安全性评估模型。而 BP 神经网络模型可以在不揭示建筑结构废墟安全影响因素与安全评估结果之间复杂的、模糊的数学关系的前提下,直接基于训练学习样本建立建筑结构废墟安全评估模型。

此外,考虑到砖混结构当前在我国存在的数量尤为庞大,且历次震害表明砖混结构在强烈地震动作用下易发生严重破坏或倒塌。因此,建立砖混结构废墟救援安全评估模型是当前地震应急救援工作的当务之急。

基于上述现状,本文基于若干地震现场废墟结构应急救援案例以及笔者地震现场应急处置工作经验,采用 BP 神经网络的分析方法建立了砖混结构废墟救援安全评估模型。

## 2 砖混结构废墟救援安全评估模型构建

### 2.1 BP 神经网络模型

BP 神经网络模型是一种按照误差逆向传播的多层前馈神经网络算法,同时也是目前应用最为广泛的神经网络模型之一<sup>[6-10]</sup>。BP 神经网络模型推导过程十分严谨、理论发展得也十分完善,其计算与推导方法在相关参考书中有很详细的介绍<sup>[11]</sup>,在此不再赘述。一个典型的 BP 神经网络模型由输入层、隐含层、输出层构成,每一层均由数量不等的神经元组成,图 1 为一种典型的 BP 神经网络模型拓扑结构。

影响砖混结构废墟安全的因素众多,且这些影响因素既具有很强的不确定性,也具有模糊

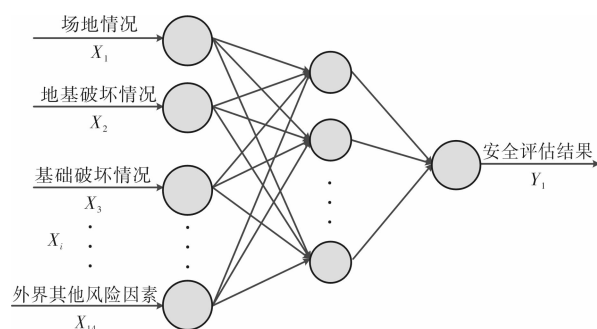


图 1 BP 三层 BP 神经网络模型拓扑结构

的关联性。而 BP 神经网络模型因具有特殊的算法结构和误差控制机制,可以在不事先揭示影响因素与输出结果之间复杂、模糊的映射关系的数学方程的情况下得到误差平方和最小的“影响因素—输出结果”映射关系。因此,本文选用 BP 神经网络模型建立了砖混结构废墟救援安全评估模型。建立砖混结构废墟救援安全评估模型的过程中,将影响结构废墟安全性的因素作为输入层,经过 BP 神经网络模型的运算得出的安全评估结果作为输出层。

### 2.2 影响因素及安全等级的划分

在地震救援现场,建筑结构废墟安全与多种影响因素密切相关,如受压构件承载力、受压墙柱的裂缝情况、地基破坏情况等。通过《危房鉴定标准》<sup>[12]</sup>以及历次救援行动中的救援经验<sup>[13-15]</sup>,本文共确定 14 个废墟结构安全影响因素。为使这些影响因素能够用于砖混结构废墟的安全性评估,将每个影响因素划分成了若干种子类。基于专家经验和救援现场实际情况,每一子类被赋予不同的影响因子,各影响因子将作为输入层数值带入 BP 神经网络模型运算。各影响因素具体情况及其影响因子见表 1。表 1 中,  $P_{sdm}$  为承重构件中危险构件百分数,按式(1)计算。

$$P_{sdm} = [2.4n_{dc} + 2.4n_{dw} + 1.9(n_{dmb} + n_{drt}) + 1.4n_{dsb} + n_{ds}] / [2.4n_c + 2.4n_w + 1.9(m_{mb} + n_{rb}) + 1.4n_{sb} + n_s] \times 100\% \quad (1)$$

公式(1)中右边各参数物理意义见表 2。其中构件总数量是指构件在整个结构中所含数量,若无该类承重构件,对应的该构件数取 0,危险数量是各类构件符合对应危险构件判别标准的数量。

使用 BP 神经网络建立砖混结构废墟救援安全评估模型的过程中,将安全性评估结果定义为神经网络输出层。本文中将结构废墟救援安全性的评估结果分为三个等级,各等级对应的废墟结构安全状态及其对应的安全指数区间见表 3。其中安全指数是大小在 0~1 之间的衡量废墟结构安全状态的指标和参数,安全指数越大,废墟结构越不安全。

表 1 砖混废墟结构影响因素及影响因子

序号	影响因素及其代码	含义	影响因子
1	场地情况 $X_1$	场地稳定, 无山体崩塌、滑坡、垮岸、液化、水患等危及建筑安全的影响	0.4
		场地不稳定, 出现山体崩塌、滑坡、垮岸、液化、水患等危及建筑安全的影响	0.6
2	地基破坏情况 $X_2$	地基稳定, 无滑移和滑动迹象	0.4
		地基不稳定产生滑移, 水平位移量大于 10 mm, 并对上部废墟结构有显著影响, 且有继续滑动迹象	0.6
3	基础破坏情况 $X_3$	基础坚实, 承载力足以支撑废墟结构	0.4
		基础老化、腐蚀、酥碎、折断, 不足以支撑废墟结构	0.6
4	毗邻建筑情况 $X_4$	无毗邻建筑或毗邻建筑保存完好, 无威胁	0.3
		结构整体倾斜, 但倾斜量不超过高度的 1/100, 对废墟结构影响较小	0.5
		周围房屋严重破坏, 倾斜量超过高度的 1/100, 有倒向废墟的危险	0.7
5	砖混结构构件破坏情况 $X_5$	墙体 柱 主梁 次梁 楼屋面 屋架	若 $P_{sdm}$ 不小于 30% 取 0.6; 小于 30% 取 0.4。
6	墙体交接处的连接情况 $X_6$	墙体及其交接处的连接, 在墙砌体和抹灰层面等面饰上均无裂缝, 震前已有的裂缝未扩展	0.4
		墙体及其交接处的连接处出现裂缝, 震前已有的裂缝出现扩展	0.6
7	楼屋盖与墙体交接处的连接 $X_7$	楼屋盖与墙体连接良好, 无松动滑移情况	0.4
		楼屋盖破坏与墙体连接不良, 出现开裂、移位等情况	0.6
8	构造措施情况 $X_8$	构造柱、圈梁基本完好, 没有出现断裂等严重破坏情况	0.4
		无构造措施或者构造柱、圈梁出现破损断裂、滑移等情况	0.6
9	女儿墙、出屋面烟囱等非结构构件破坏情况 $X_9$	无女儿墙、出屋面烟囱等非结构构件或者非结构构件完好, 无脱落、坠落等现象	0.4
		非结构构件出现破损、坠落、危机救援现场	0.6
10	砂浆强度 $X_{10}$	M7.5 及以上	0.3
		M5	0.5
		不足 M2.5	0.7
11	施工质量 $X_{11}$	施工质量良好, 砂浆灰缝饱满, 墙体平整	0.4
		施工质量较差, 墙体不够平整, 砂浆灰缝空虚	0.6
12	构件之间的接触点 $X_{12}$	两个构件之间接触点数量足够多, 大于等于四个, 接触面足够大	0.3
		两个构件之间接触点数量不足, 三个接触点, 接触面积较小	0.5
		两个构件之间接触点较少, 小于三个接触点, 或者接触面积严重不足	0.7
13	生存空间大小 $X_{13}$	大空间, 至少一个人进入是无障碍的	0.3
		小空间, 空隙需要简单的清理障碍即可进入的	0.5
		狭小空间, 必须通过清障扩张空间后方可进入的	0.7
14	外界其他风险因素 $X_{14}$	有毒害物质; 辐射; 噪音; 灰尘; 围观群众; 家属情绪失控; 媒体; 恶劣天气; 设备不足或损坏; 外部扰动	每一项影响因子为 0.1, 多项可累加。

表 2 砖混结构承重构件危险情况判别标准

构件	数量	危险构件判别标准
墙体	总数量 $n_w$	墙体出现贯穿整个墙体的裂缝、或者交叉的 X 形剪切裂缝; 墙体出现严重倾斜、局部破损、倒塌或者整个墙体倒塌。
	危险数量 $n_{dw}$	
柱	总数量 $n_c$	柱产生严重倾斜、破坏、开裂, 并且裂缝出现扩张的趋势, 有断裂危险, 或者柱已被剪断。
	危险数量 $n_{dc}$	
主梁	总数量 $n_{mb}$	梁跨中部位, 底面产生横断裂缝, 其一侧向上延伸达梁高的 2/3 以上; 梁顶面产生多条明显的水平裂缝, 上边缘保护层剥落, 底面伴有竖向裂缝;
	危险数量 $n_{dmb}$	
次梁	总数量 $n_{sb}$	连续梁在支座附近产生明显的竖向裂缝; 产生超过跨度 1/150 的挠度, 且受拉区的裂缝宽度大于 1 mm。
	危险数量 $n_{dsb}$	
楼屋面	总数量 $n_s$	产生超过跨度 1/150 的挠度, 且受拉区的裂缝宽度大于 1 mm; 现浇板上面周边产生裂缝, 或下面产生交叉裂缝; 预制板下面产生明显的竖向裂缝保护层剥落, 半数以上主筋外露, 截面减少。
	危险数量 $n_{ds}$	
屋架	总数量 $n_{rb}$	产生超过跨度 1/150 的挠度, 且下弦产生裂缝大于 1 mm 竖向裂缝; 支撑系统失效导致倾斜, 其倾斜量超过屋架高度的 2/100; 保护层剥落, 主筋多处外露; 端节点连接松动, 且有明显裂缝; 在支座与集中荷载部位之间产生明显的水平裂缝或斜裂缝。
	危险数量 $n_{dr}$	

表 3 废墟结构安全等级判定表

安全等级 Y	废墟结构安全状态	安全指数区间
等级一	废墟结构安全。废墟结构稳定, 可以直接进入	[0, 0.5]
等级二	废墟结构稳定但须排险措施。废墟结构无倒塌的危险, 但有造成的危险因素须排除	(0.5, 0.7]
等级三	结构有二次倒塌的危险。须做好支撑及加固、排险、清理等安全措施	(0.7, 1]

表 4 6 组砖混结构地震救援案例

序号	样本	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6
1	场地情况	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
2	地基破坏情况	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
3	基础破坏情况	0.60	0.40	0.40	0.60	0.40	0.40
4	毗邻建筑情况	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.30
5	砖混结构构件破坏情况	0.60	0.60	0.60	0.60	0.40	0.40
6	墙体交接处连接情况	0.60	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
7	楼屋盖与墙体交接处的连接	0.60	0.60	0.60	0.60	0.40	0.40
8	构造措施情况	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.40
9	女儿墙、出屋面烟囱等非结构构件破坏情况	0.60	0.40	0.40	0.60	0.40	0.40
10	砂浆强度	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.50
11	施工质量	0.60	0.60	0.60	0.60	0.40	0.40
12	构件之间的接触点	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
13	生存空间的大小	0.30	0.70	0.70	0.70	0.30	0.30
14	外界其他风险因素	0.20	0.30	0.30	0.20	0.00	0.00
评估结果		0.80	0.60	0.60	0.80	0.40	0.40

### 2.3 模型的建立与验证

由于 BP 神经网络是一个样本学习的过程, 故在建立砖混结构废墟救援安全评估模型的过程中首先选取了 5 个实际救援案例作为学习样本, 然后运用 MATLAB 编写程序对模型进行训练, 最终得到评估模型。

依据表 1~表 3 中的规则, 将本文所选取的所有救援案例的各影响因素和废墟安全等级进行进行了数字化。数字化结果见表 4。建立模型过程中选取表 4 中的前 5 组样本进行神经网络训练, 而第 6 组样本将在后文中用来验证模型。

本文所建立的砖混结构废墟救援安全评估 BP 模型采用典型的三层神经网络模型, 其中其中输入层的神经元个数为 14 个, 输出层神经元个数为 1 个。对于隐含层神经元个数, 选取 Sigmoidal 函数作为隐含层的激活函数, 并采用式(2)确定。

$$n_l = \sqrt{0.43mn + 2.54m + 0.77n + 0.35} + 0.51, \quad (2)$$

式中:  $m$  为输入层神经元的个数,  $n$  为输出层神经元的个数, 对计算的结果  $n_l$  取整, 计算得隐含层神经元个数为 8。

确定完学习样本以及各层神经元个数以后, 采用 MATLAB 编译了砖混结构废墟救援安全评估 BP 模型训练程序。在程序编写中, 因 MATLAB 对于很多数学模型具有现成的工具箱供使用, 因此本文采用 MATLAB 中的神经网络工具箱进行计算分析。使用 BP 神经网络工具箱之前需要设定一些主要参数: 首先确定学习率为 0.01, 学习率与迭代

次数呈反比例关系, 学习率越小, 迭代次数越多, 训练时间越长; 然后确定动量常数为 0.9, 动量常数可以加快网络学习的速度, 能够加快收敛; 确定最大迭代次数为 100 000 次, 为了防止计算机程序计算过程中出现一直不收敛的问题, 当达到规定的训练次数时候训练结束; 确定模型的目标精度为  $10^{-10}$ , 当精度达到时训练停止; 初始权值和阈值的取值范围是  $(-1, 1)$  之间的随机数。将表中前三组样本作为训练样本输入到神经网络中, 对 BP 神经网络进行训练, 其网络训练的主程序代码如下所示。

```
network1 = newff( minmax(p1), [8, 1], {'logsig','purelin'}, 'traingdx');
network1 = init( network1 );
network1.trainparam.show = 25;
network1.trainparam.lr = 0.01;
network1.trainparam.mc = 0.9;
network1.trainparam.epochs = 100000;
network1.trainparam.goal = 1e-10;
network1.trainparam.min_grad = 1e-7;
[ network1, tr ] = train( network1, p1, t1 );
a = sim( network1, p1 );
```

在训练 155 步之后误差为  $9.01 \times 10^{-11}$ , 误差满足精度要求, 训练停止。其误差下降曲线如图 2 所示。

网络训练完成后, 利用第 6 组样本进行样本检验, 以验证砖混结构废墟救援安全评估 BP 模型的准确性, 验证样本的数据如下所示。

$$p2 = [0.40 \ 0.40 \ 0.40 \ 0.30 \ 0.40 \ 0.40 \ 0.40]$$

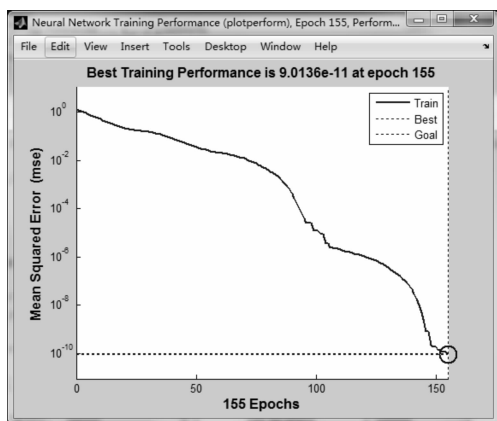


图2 BP神经网络模型训练误差下降曲线

0.40 0.40 0.50 0.40 0.30 0.30 0.00]。

验证代码为：

$a = \text{sim}(\text{network1}, p2)$

得出的网络输出结果为：

$a = 0.3939$

而实际样本数据为：

$t2 = 0.4$

$p2$  表示待验证的样本， $a2$  表示 BP 神经网络计算的结果。

由此可以看出 BP 神经网络模型判断出的结果与实际结果基本一致，该模型在准确性上能够得到保证。

### 3 算例运算

对于模型的算例运算，本文选取汶川 8.0 级地震中国国家救援队卿静文的案例<sup>[14]</sup>进行计算，该案例的基本情况如下。

2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震，绵竹德阳遭受重创，东汽中学教学楼全部倒塌，死亡师生 248 名。国家地震灾害紧急救援队执行上级命令，在都江堰（新建小学、聚源中学、中医医院、水建家属楼）完成搜救工作后，即刻赶往德阳东汽中学、东汽公司展开新地点的搜救。救援地点位于四川德阳绵竹汉王镇东汽中学。废墟现场外部实际情况为：整体教学楼为四层，教学楼由东向西跨度约 36 m，南北长度约 18 m，东西呈王字形（倒放的王字形）。除主楼未倒，其余都出现破坏十分严重，临近主楼的建筑完全倒塌，呈现一堆废墟。“王”字头尾部的教学楼完全塌落形成大面积的废墟山，位于“王”字接口处的教学办公室部分破损，救援废墟有二次倒塌的危险。国家救援队救援的区间为“王”字左侧的前方区域。卿静文在“王”字头部的接口处，具体情况如图 3 所示。

根据现场的测量和观察，得到以上描述，然后依据表 1～表 3 中的规则对砖混废墟结构的影响因素和安全等级进行数子化，其样本的参数为  $p2 = [0.4 \ 0.4 \ 0.4 \ 0.7 \ 0.6 \ 0.6 \ 0.6 \ 0.6 \ 0.6 \ 0.7 \ 0.6$



图3 地震救援现场情况

0.4 0.7 0.2]，将待评定的样本数据输入到建立的 BP 神经网络模型中，得到计算结果为  $a2 = 0.8295$ ，因此该废墟结构安全评估结果为该处救援废墟有二次倒塌的危险。采用本文所建立的砖混结构废墟救援安全评估模型计算的结果与实际救援案例结果基本相符，且该模型具有物理意义明确、操作简单、便于工程实际应用的显著特点。

### 4 总结

本文首先对砖混结构废墟救援安全评估模型的研究现状和需求分析进行了研究，并在简要介绍 BP 神经网络基本理论的基础上说明了采用 BP 神经网络模型建立砖混结构废墟救援安全评估模型的合理性；然后对砖混结构废墟救援安全评估模型的影响因素、安全等级进行了详细的划分和说明，给出了各影响因素的影响因子和各安全等级的安全等级指数，并基于 5 组实际救援案例采用 MATLAB 建立了砖混结构废墟救援安全评估模型；最后采用实际救援案例对所建立的模型进行了验证和算例计算，验证和算例计算结果表明，本文所建立的砖混结构废墟救援安全评估模型计算结果较为精确，且模型操作简单，便于工程实际应用。

### 参考文献：

- [1] 王东明. 中国地震救援废墟安全评估综合管理系统[J]. 土木工程学报, 2013, 46(Supp. 1): 1-6.
- [2] 杜修力, 欧进萍. 建筑结构地震破坏评估模型[J]. 世界地震工程, 1991(3): 52-58.
- [3] 孙柏涛, 王东明. 地震现场建筑物安全鉴定智能辅助系统研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(5): 209-213.
- [4] 肖东升. 基于 GIS 和 CA 的地震灾害压埋人员情景分析与评估理论[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [5] 颜冬启. 服务于地震人员搜救的重点目标快速评估技术研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014.
- [6] 于山, 王海霞, 马亚杰. 三层 BP 神经网络地震灾害人员伤亡预测模型[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(6): 113-118.
- [7] 刘西拉, 李楚舒. 基于神经网络的高层建筑结构体系选择[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(5): 36-41.

(下转第 29 页)

- 中国公路综合自然区划体系框架研究总报告[R]. 西安: 长安大学, 2008.
- [11] 张金山, 谢洪, 王小丹, 等. 西藏尖姆普曲泥石流[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 99–103.
- [12] 阳岳龙, 龙万学, 杨禹华, 等. 贵州省主要地质灾害危险度区划研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 5–10.
- [13] 齐洪亮. 公路自然灾害评价系统的研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [14] 郑启萍, 徐得潜. 草本植物护坡机理及其固土效应试验研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2014, 37(2): 226–228.
- [15] 甘建军, 吴晗, 唐春, 等. 四川理县塔斯沟多发性特大泥石流成灾机理与特征[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 59–63.
- [16] 吴平, 姚华彦, 朱大勇, 等. 水对皖红砂岩石力学特性影响的试验研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2014, 37(1): 82–86.
- [17] 成玉祥, 段玉贵, 李格烨, 等. 岩石冻融风化作用积累泥石流物源试验研究[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 46–50.

## The Study on the Risk Regionalization of Highway Debris Flow Disasters

Zhao Huan, Tian Weiping, Li Jiachun, Qi Hongliang and Yin Chao  
(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,  
Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to provide macro-level reference for prevention and management of highway debris flow disasters, risk regionalization of highway debris flow disasters was studied. The causal factors of disasters are analyzed from topography condition, water condition, material sources and vegetation condition. In line with disaster effects, the assessment indicator system is selected and each indicator is rated and scored. Risk assessment model of highway debris flow disaster is established adopting the causal factors superposition principle. Each assessment indicator classification map and Risk Figure of Highway Debris Flow Disasters in China are calculated and plotted by GIS, and in view of risk degree, Risk Regionalization Figure of Highway Debris Flow Disasters in China is drew. The highway debris flow disasters in China is rated into four risk levels including extremely high risk area, high risk area, medium risk area and low risk area. The result of risk regionalization was in line with the distribution feature of highway debris flow disasters in China.

**Key words:** highway engineering; debris flow disasters; causal factor; risk assessment; GIS; risk regionalization

(上接第 14 页)

- [8] Liu X L, Li C S. Hipred; An expert system for structural preliminary design of high-rise buildings[C]//Advances in Steel Structures ICASS'96. Hong Kong: ICASS, 1996: 899–994.
- [9] Tzafestas S. Expert systems in engineering applications[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1993: 367–378.
- [10] 缪升, 刘本玉, 叶燎原. 多层砖房震害预测的人工神经网络方法及实践[J]. 世界地震工程, 2000, 16(1): 20–28.
- [11] Simon Haykin. 神经网络与机器学习[M]. 申富饶, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [12] 中华人民共和国建设部. CJ13\_86 危房鉴定标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [13] 杨玉成. 现有多层砖房的震害预测方法及其可靠度[J]. 地震工程与工程震动, 1982, 2(3): 75–86.
- [14] 尹之潜. 地震灾害及损失预测方法[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [15] 曲国胜. 汶川特大地震专业救援案例[M]. 北京: 地震出版社, 2009.

## Research on Security Evaluation BP Model of Brick-concrete Structure Ruins

Wang Dongming<sup>1</sup>, Liu Huan<sup>2</sup> and Li Yongjia<sup>1</sup>

(1. China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 10029, China;

2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The security evaluation model for structure ruins rescue can effectively serve earthquake emergency rescue work under the condition of no waste a mass of manpower and material resources. The rescue security evaluation model for brick-concrete structure damage seriously in earthquakes is established. Based on research status and requirement analysis of rescue security evaluation model, BP neural network model is adopted to establish the safety assessment methods and procedures, dividing points and safety level judging principle of influence factors for evaluation model are analyzed. The model is trained by using MATLAB based on the actual rescue cases and validated as well as calculated by examples. The results of model validation and example calculation show that the established rescue security evaluation model for brick-concrete structure can directly applied to the safety evaluation work without exploring accurately the mechanism of structure collapse of brick-concrete structure. And the model has the following marked characteristics such as accurate results, easy operating, and convenient for engineering application.

**Key words:** earthquake rescue; security evaluation; brick-concrete structure ruins; BP neural network model