

# 基于砖混结构废墟救援安全评估专家系统研究<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:** 基于砖混结构废墟救援特点, 对其安全评估专家系统的功能、系统架构、系统界面进行了设计, 并以实际震灾救援案例对所建立的系统进行了验证和测试。结果表明, 该砖混结构废墟救援安全评估专家系统应用方便, 可很好地协助地震应急救援工作。

**关键词:** 地震救援; 结构废墟; 安全评估; 专家系统

**中图分类号:** P315-39

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)04-0656-08

## 0 引言

人工智能作为一门多学科交叉的、新兴的学科, 是当今世界上三大尖端技术之一。而专家系统则是人工智能应用领域诞生最早、应用最广泛、研究最活跃的研究方向(苏键等, 2006)。所谓专家系统, 是指基于特定专业领域内一位或多位专家的工作经验和专门知识建立知识库、数据库或数学模型, 并通过人工智能中的逻辑推理技术编译智能计算机程序, 以达到不受时空限制地模拟和求解通常只有专家才能解决的各种复杂问题的目的(席铮, 2005)。单个专家因为经验和专业知识储备量的差异, 在处理问题过程中会出现处理方案片面、随意和存在技术偏见等诸多问题。专家系统则可以克服专家工作中面临的上述问题, 既可以不受时间、空间和环境条件的限制而正常工作, 又可以通过系统化、条理化和综合决策功能来提高解答和模拟结果的客观性、科学性和稳定性。一般来说, 对于某些特定的问题, 专家系统解答和模拟实际问题的能力、效率和水平会优于单个专家。

1965年费根鲍姆等研制出首个专家系统。随后, 国内外许多学科领域开展了相关专家系统的研究与开发。20世纪70至80年代该系统开始在地震工程领域被广泛地推广和应用。1979年, 美国普度大学姚治平、付京生等开始研发震后房屋破损评估专家系统 SPERIL。1985年, 斯坦福

大学 Blume 地震工程研究中心开展了场地地震危险度评估专家系统的相关研究, 并于1988年针对加州的场地地震危险度评估工作完成了场地地震危险度评估专家系统 SHES。刘西拉和薛庆(1987)基于目标驱动控制策略研发了钢筋混凝土结构破损状态评估专家系统。刘恢先(1987)负责开展了国家自然科学基金“七五”重大项目“工程建设中的智能辅助决策系统的应用研究”, 并于1996年发布了智能辅助地震区划系统 IASH-ES。随后, 专家系统在我国地震工程领域得到了长足的发展。1989年, 杨玉成等发布了以知识为基础的多层砌体房屋震害预测专家系统, 并于1992年发布了城市现有房屋震害预测智能辅助决策系统 PDSMESMB-1, 该系统曾获国家科技进步二等奖(杨玉成等, 1992)。石兆吉等(1997)研究并发布了地震液化判别与评价的专家系统。孙柏涛和王东明(2003)研究出我国第一个应用于地震应急现场的建筑物安全鉴定智能辅助系统。郭红梅等(2008)基于GIS和空间决策技术设计并开发了城市地震现场搜救指挥辅助决策系统, 该系统整合并集成了震害预测、地震灾情快速评估、不同结构类型废墟搜救行动方案、现场搜救指挥部署决策模型、压埋人员情况分析等专业知识, 综合建立了地震现场搜救指挥专家系统, 但所建立的专家系统基础资料数据库匮乏、某些模块的专业模型尚不完善, 专家系统评估结果距离具有专家水平还有很大差距等。尽管经过多年的发展, 我国在地震工程领域拥有了

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-05-22.

基金项目: 地震行业科研专项(201208019)、地震星火计划(XH1034)和国家自然科学基金(51208479)联合资助。

许多专家系统,但目前专门针对不同结构类型的建筑结构废墟救援安全评估专家系统研究尚处于空白阶段。

我国是地震多发国家,历次强烈地震发生后都会导致大面积建筑的损坏或倒塌。尤其是当前,我国存在量大面广的砖混结构房屋,遭受强烈的地震作用后该类结构房屋倒塌数量十分庞大。震害表明,由于地震造成的砖混结构房屋的倒塌不仅会引起灾区人员的巨大伤亡,而且还会造成巨大的财产损失。为最大限度地降低地震灾害所造成的损失,震后我国政府、社会组织、企业和个人都会在第一时间投入大量人力、物力进行应急救援工作。然而,针对建筑结构废墟的应急救援工作,救援队面临的首要问题是如何保障救援人员和被困人员的“双安全”(陈运泰等,2013),即在最大限度地挽救被困人员的前提下不产生额外的人员伤亡。因此,每次救援活动开展之前应首先进行建筑结构废墟救援安全评估工作。为解决我国砖混结构废墟救援安全评估工作存在的问题,本文在已建成的砖混结构废墟救援安全评估模型的基础上,设计并探讨了砖混结构废墟救援安全评估专家系统。

## 1 系统需求分析

我国现阶段地震现场建筑结构废墟安全评估,通常由经验丰富的结构工程专家完成。一般流程如下:首先,由结构工程专家初步确定安全评估的对象和范围。合理的对象和范围的确定,既可以节省搜救时间、提高搜救效率,又可以有的放矢地针对需要搜救的废墟进行科学合理的搜救,使得整个搜救评估工作不出现偏差。其次是评估区域信息收集。全面细致的地震废墟信息收集,可以对搜救工作起到事半功倍的作用。信息收集主要包括废墟场地信息,相邻建筑结构是否对搜救废墟存在潜在危险,被搜救建筑物的设计、施工、构件的破坏程度和连接情况等。再次,确定地震废墟的安全评估结果。通过对评估区域进行信息收集,结构工程专家结合专业知识,并综合以往的工作经验和搜救案例给出安全评估结果。为现场地震救援工作进行指导。最后,提出应对方案。充分利用信息采集中收集到的信息,对可能会给救援队员带来伤害的潜在因素给出应对措施,

协助救援队制定救援方案,最大限度地保证救援过程中所有人员的生命安全。这种工作流程虽然在我国历次大震中的现场救援工作中带来不错的效果,但是也存在一些弊端:第一,由于建筑结构废墟救援工作具有“时间要求紧、技术含量高、工作强度大”的显著特点,所以实际工作中必须对专家的经验、知识储备以及身体素质条件提出严格的要求;第二,我国具有丰富地震现场应急救援经验的结构工程专家数量非常有限,难以满足现有方法对地震应急救援专家需求的数量;第三,结构工程救援专家分布在全国各地,且震区道路桥梁也会发生不同程度的震损,这将成为结构工程救援专家及时到达地震现场实施救援指导的制约因素。

而利用专家系统可以很好地解决我国现阶段建筑结构废墟安全评估工作所遇到的上述问题。其原因主要有以下两方面:第一,专家系统建立过程中融合了行业内各方面的专业理论知识和许多知名专家的经验及技术,其水平和能力一般会优于单个专家,因此使用专家系统评估建筑结构废墟救援安全等级时评估过程具有系统化、条理化、综合化的特征,且专家系统的评估结果也具有客观性、稳定性和科学性的显著优点;第二,由于专家系统是人工智能系统的一种,其本质是具有专家评估能力的计算机程序,因此使用专家系统进行建筑结构废墟救援安全等级评估时可以不受时间、地点、环境以及工作强度的影响,在没有结构工程专家在场的情况下,只需救援指挥人员熟悉系统的操作流程和具有能够初步判断评估结果离散性的能力,即可保证废墟救援指挥工作的正常运作。虽然目前在土木工程领域乃至地震工程领域有许多专家系统存在,但还未开发出一套行之有效的、专门应用于砖混结构废墟救援安全评估工作的专家系统。因此,有必要基于现有的砖混结构废墟救援案例和资料建立一套完整的、实用的、有效的砖混结构废墟救援安全评估专家系统。

考虑到砖混结构废墟安全评估工作的特殊性,所以所开发的专家系统应满足以下3方面的需求:(1)实用性。所要开发的专家系统是在缺少结构专家现场指导的前提下,在地震发生后为救援指挥人员提供砖混结构废墟安全评估的依据,因此该系统必须操作简单且界面友好。(2)功能完备

性。本专家系统主要服务于地震救援,除了能够对砖混结构废墟进行评价外,还应该协助制定救援方案的功能,因此在给出评估结果的同时也会给出相似案例与相应的参考文献,还增加了估算器的功能,能够对地震现场各种结构构件的重量进行估算,帮助救援队合理地选用救援设备和设置救援方案。(3) 开放性。该专家系统还应该有案例搜集的过程,将实际救援过程中产生的案例添加到数据库中,使其他救援人员在使用这个系统的时候可以借鉴参考这些案例,这些案例也可以作为专家系统的样本供这个专家系统学习,从而达到完善专家系统的目的。

## 2 系统功能设计及实现过程

### 2.1 功能设计

基于以上需求分析,砖混结构废墟救援安全评估专家系统应具有以下 3 方面的主要功能:(1) 对砖混结构废墟进行救援安全等级的评估;(2) 建立救援案例库,以便于用户根据救援条件进行搜索调用;(3) 协助制定救援方案的相关功能。

其中在地震救援现场协助救援队员对砖混结构废墟进行安全评估是专家系统的核心功能,即地震应急救援队可在地震应急工作现场通过简单的操作快速有效地评定出砖混结构废墟救援安全等级。而在进行建筑废墟安全评估工作之前,应首先对地震要素信息进行采集,所采集的地震要素信息主要包括地震名称、发震时间、震级、震中距等,同时在有条件的情况下还可以上传烈度图。输入地震要素信息完成之后,需要将待救援砖混结构基本信息输入系统中,这些基本信息主要包括建筑名称、总层数、地理位置、地震现场基本描述等。输入待救援砖混结构基本信息的主要作用有 2 点:第一,完成砖混结构废墟救援案例的采集工作,为未来能够进行科学的案例分析和经验总结提供详实的基础资料;第二,所输入的建筑结构基本信息包括了所有的结构废墟救援安全等级影响因素,而这些影响因素是进行安全评估工作的必要信息。

在对砖混废墟结构进行安全评估之后,为充分应对救援过程中所要进行的破拆、顶升、移除构件等工作,需对各类材料或构件的重量进行计

算,因此专家系统还应附带重量估算器的功能,即能够对建筑材料量、钢材等不同材料、构件进行重量计算,并给出结果以辅助指导救援队制定合理的救援方案和选取合适的救援设备。综上所述,专家系统所有功能包括的基本内容以及不同功能间的相互关系如图 1 所示。

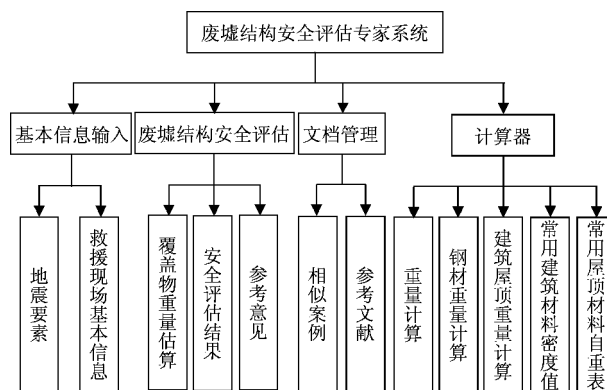


图 1 系统功能设计

Fig. 1 System functional design

### 2.2 架构设计

本文所建立的砖混结构废墟救援安全评估专家系统由用户界面层 (User Interface Layer)、业务逻辑层 (Business Logic Layer)、数据访问层 (Data Access Layer) 3 部分组成。用户界面层即表示层,直观地表现在浏览器所呈现出的界面,通过用户界面层,用户可以将信息和数据传递给业务逻辑层,其返回的结果也最终呈现在用户界面中,在用户界面用户可以和本专家系统进行直观的交流。业务逻辑层是系统的核心部分,在该层中封装了安全评估、数据计算等相关业务的操作,在本层中进行业务处理并实现系统的相关功能。在数据访问层中可以进行数据的操作,可以实现数据的存储、调用、维护等功能。本专家系统采用的是基于 ASP.NET 技术的 B/S (Browser/Server) 架构。B/S 架构的服务器端集成了专家系统的核心功能,即将系统的业务逻辑层和数据访问层中的核心功能全部集中在服务器端,这种处理方式的最大好处就是系统升级、改进或升级时只需更新服务器端的数据即可,降低了成本。而 B/S 架构的客户端是浏览器,用户可以通过浏览器经互联网访问系统服务器端。整个系统采用与 ASP.NET 平台有很好兼容性的 C# 编程语言,选用 SQL Server

2008 后台数据库存储专家系统中的文献资料以及救援案例等各种数据。

砖混结构废墟救援的安全评估是本专家系统的核心工作。砖混结构废墟救援安全评估功能是基于砖混结构废墟救援安全评估 BP 神经网络模型而实现的。砖混结构废墟救援安全评估 BP 神经网络模型是指根据若干地震现场砖混结构废墟应急救援案例以及笔者在地震现场应急处置工作经验,采用 BP 神经网络的方法建立的砖混结构废墟救援安全评估模型。该评估模型以场地与地基情况、基础破坏情况、结构构件以及非结构构件破坏情况、建筑材料与施工质量、建筑环境条件以及生存空间大小等 14 个影响因素作为基本条件,首先划分并确定出不同影响因素的判别标准和影响因子以及砖混结构废墟安全等级判定原则,然后基于实际救援案例采用 BP 神经网络按照一定的误差精度进行了学习训练,最后对训练完成的模型进

行了回判和检验。回判和检验结果表明,所建立的评估模型具有较高的准确度(王东明等,2016)。确定砖混结构废墟救援安全评估 BP 神经网络模型之后,采用 C#编程语言将模型接入专家系统,且配置在专家系统的服务器端。应用过程中,用户不需知道砖混结构废墟救援安全评估模型工作原理,只需在客户端所呈现的用户界面进行操作即可通过互联网向服务器发出请求并进行数据处理和交换,并获得评估结果以及其他的相关信息。砖混结构废墟救援安全评估专家系统的工作流程见图 2。

2.3 界面设计

基于系统功能设计结果和系统工作流程,参考一些优秀设计范例(孙路强等,2013),设计并确定了专家系统界面。为了使该系统网页的页面风格得到统一,在编程过程中采用了母版页技术,通过母版页的创建,专家系统中的每一个页面均可使用母版页的页面布局,这就减轻了开发过程中开发人员保持页面协调制作一致外观的工作量。系统主要由地震信息录入、建筑废墟信息录入、建筑物废墟安全评估、相似案例与相关文献、估算器 5 个界面组成。

2.3.1 地震信息录入

图 3 为地震信息录入界面。当一次地震发生后,分别在此界面中输入地震名称、发生时间、震级和震中距,还可以上传初步预估的地震烈度图(李东平等,2013),点击提交后,系统会自动生成一次地震事件,其后的所有评估结果都会被自动记录到此次地震事件中,并便于日后的查询与调用。

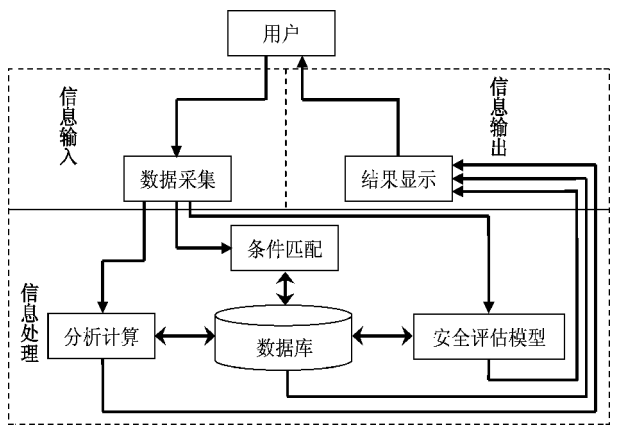


图 2 专家系统的工作流程  
Fig. 2 Workflow diagram of expert system



图 3 地震信息输入界面图  
Fig. 3 Input interface diagram of earthquake information

### 2.3.2 建筑废墟信息录入

图4为建筑废墟信息录入界面。用户在进行建筑废墟安全评估时,需要首先录入将要进行评估的建筑废墟基本信息,其中包括建筑名称、总层数、地点或位置、残留层数或高度、倒塌位置、居住人数和现场描述,同时要选择建筑物的用途,包括学校、医院、住宅、办公楼、超市、体育馆、厂房、生命线用房和其他9类,并且在结构类型中选择砖混结构,信息录入和选择完毕后,点击提交按钮。

### 2.3.3 建筑物废墟安全评估

图5为建筑废墟信息录入界面。用户需要根据建筑废墟的具体情况录入14项影响因素。完成以

上14项影响因素的选择后,点击提交,系统会自动给出对于此建筑废墟的安全评估结果。

### 2.3.4 相似案例与相关文献

在完成建筑废墟安全评估后,系统能够自动给出与此救援案例相关的相似案例和相关文献,为救援人员提供辅助决策参考。图6为相似案例与相关文献界面。

### 2.3.5 估算器

系统还具备估算器功能模块,可以分别对建筑重量、钢材重量和建筑屋顶重量进行估算,还可以查询常用建筑材料密度值和常用屋顶材料的重量。图7为建筑重量查询与估算界面。

图4 建筑废墟信息录入界面图

Fig. 4 Input interface diagram of information of structure ruins

图5 建筑废墟安全评估界面图

Fig. 5 Safety assessment interface diagram of structure ruins





图 6 相似案例与相关文献界面图

Fig. 6 Interface diagram of similar case and literature



图 7 估算器界面图

Fig. 7 Interface diagram of estimator

### 3 系统应用

砖混结构废墟救援安全评估专家系统主要服务于地震救援行业，针对的用户具备一定的建筑结构专业知识，但不懂如何对结构废墟进行安全评估的地震救援行业从业人员，这些从业人员只要会使用浏览器即可操作该套专家系统。该系统的主要应用范围仅限于砖混结构废墟搜索与营救，在缺少具备救援经验与结构专业背景专家的时候，协助救援队员对砖混结构废墟的安全性做出评估，并对救援现场的结构构件以及覆盖物的重量进行简单的估算，以供救援队员参考。该系统的使用方法非常简单，只需要在浏览器中通过点击和输入即可完成所有操作。其界面操作与用户之间有很强的交互性。首先

在有互联网的情况下打开浏览器，输入网址 [www.dzjy.org.cn](http://www.dzjy.org.cn) 进入到 CERRSAMS 系统，然后登录，输入账号、密码、验证码后进入到这个系统，点击专家系统模块即可使用砖混结构废墟救援安全评估专家系统。将地震救援现场采集到的信息根据系统的要求提交到专家系统中，点击确认和提交，系统会输出相应的结果。系统的运算速度比较快，在根据要求输入数据之后很快就能得出评估结果。图 8 为专家系统操作流程。

为了验证本专家系统的可靠性，本文以汶川地震中都江堰市新建小学建筑废墟安全评估为例，进行系统操作实例验证。

首先登陆到系统后台，选择专家系统模块，录入都江堰市新建小学有关信息，如表 1 所示。点击提交后，进入到建筑物废墟安全评估指标选择

界面，逐一选择每一项评估指标，确认无误后，选择提交按钮，系统后台会自动完成分析与评估计算，给出评估结果。如图 9 所示，此次建筑物废墟安全评估的结果为“结构稳定但须排险措施。（废墟结构物无倒塌危险，但有造成危险的潜在因素须排除）”，并且给出了相关的提示信息。此次

安全评估结果被自动保存在系统后台的数据库中，并作为一次新的案例为后续的评估工作提供辅助参考。分别选择相似案例和相关文献可以查看到与此次建筑废墟安全评估相近的参考资料，为救援队员提供辅助决策参考。结果表明，系统评估结果与实际情况基本相符。

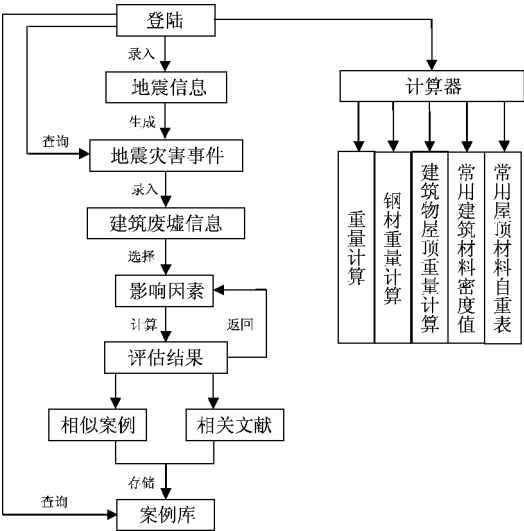


图 8 系统应用流程图

Fig. 8 Flow diagram of system application

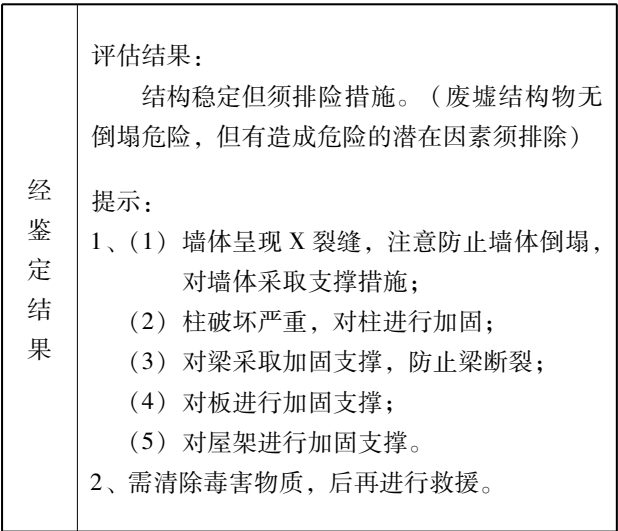


图 9 鉴定结果图

Fig. 9 Results diagram of identification

表 1 都江堰市新建小学有关信息表

Tab. 1 Information table of Xinjian Primary School in Dujiangyan

录入信息类别	具体信息
建筑名称	都江堰市新建小学
总层数	4 层
地点或位置	四川省成都市都江堰市建设路
残留层数或高度	10 m
倒塌位置	所有教室全部倒塌
居住人数	246 人
现场描述	5 月 12 日下午 2 点 28 分，大地震发生的瞬间，都江堰市新建小学 4 层楼的教学楼如瞬间垮塌，里面埋葬了 246 名师生死亡，其中教师 3 人，学生 243 人，还有 2 名学生下落不明。该教学楼系二年级至六年级教室，共 10 个班。发生地震时，除四年级一班在操场上上体育课外，9 个班级师生均在教室内上课，绝大多数学生根本来不及跑出就被深深地埋废墟底下。待救人员罗颖在一楼横梁倒塌后塌落的空间下方。横梁距地面约一米的高度。罗颖在地板的上方双脚朝向横梁外面，上身被废墟挤压呈压腿状态。胸椎以下，在废墟深处。
用途	学校
结构类型	砖混结构

通过操作实例可知，本系统具有以下特点：用户界面设计友好，系统应用操作方便，评估结果准确，信息交换和读取速度较快，可以很好地提高震灾现场废墟救援工作效率。

4 总结

本文采用 ASP. NET 平台和 SQL Server 2008 技

术,基于砖混结构废墟救援安全评估BP神经网络模型技术建立了砖混结构废墟救援安全评估专家系统,并对系统的功能与界面进行了设计和实现。本专家系统依托中国地震救援废墟安全评估综合管理系统平台,能够在地震救援现场进行砖混结构废墟的安全评估工作,并在一定程度上解决地震救援现场缺少有救援经验结构专家的难题。虽然,本文给出的案例分析为整栋砖混结构安全评估,但是并不排斥救援点的安全评估。主要因本系统具有开放性的特点,可对新的案例不断添加,随着案例数据的增多,将会更好地为不同砖混结构废墟的评估提供技术支持。

经过系统实例操作和测试可知,该系统具备如下特点:(1)能够很好地协助地震救援。本专家系统不仅能够对砖混结构废墟安全性进行评估,而且根据评估结果由数据库检索出相应的参考文献与案例。为救援方案的制定提供参考,进一步提高了救援工作的安全性和可靠性。同时,该专家系统还能够做简单的重量估算,给救援队在制定救援方案时提供量化参考。(2)系统应用的方便性。该专家系统的用户界面设计十分友好,用户利用浏览器便可完成所有的操作。且其信息的交换和读取速度是十分快捷,用户只需要熟悉浏览器的使用方法即可,随着移动终端的普及,用户能够很方便的使用这个系统。(3)系统的开放性。该专家系统提供了案例搜集功能,可以将实

际救援过程中产生的案例添加到数据库中,使该系统的案例数据库更加系统和全面。不仅可以为救援人员提供更加可靠的参考案例,而且也为砖混结构废墟应急救援培训提供了丰富的素材。

#### 参考文献:

- 陈运泰,杨志娟,张勇等.2013.从汶川地震到芦山地震[J].中国科学:地球科学,43(6):1064-1072.
- 郭红梅,黄发,陈维锋等.2008.城市地震现场搜救指挥辅助决策系统的设计与开发[J].地震研究,31(1):83-88.
- 李东平,龚俊,沈晓健等.2013.快速烈度调查系统探索与实现[J].地震研究,36(2):238-242.
- 刘恢先,杜瑞明,朱敏等.1996.智能辅助地震区划系统 IASHES[J].中国地震,12(1):1-15.
- 刘西拉,薛庆.1987.评估钢筋混凝土结构破坏状态的专家系统[J].土木工程学报,20(3):1-8.
- 石兆吉,顾宝和,张荣祥.1997.地震液化判别与评价的专家系统[J].工程勘察,(5):5-8.
- 苏键,谭平,周福霖.2006.土木工程专家系统的应用和发展趋势[J].建筑科学与工程学报,23(4):6-14.
- 孙柏涛,王东明.2003.地震现场建筑物安全性鉴定智能辅助系统研究[J].地震工程与工程振动,23(5):209-213.
- 孙路强,栗连弟,刘磊等.2013.天津测震台网综合管理系统的设计与实现[J].地震研究,36(2):258-262.
- 王东明,刘欢,李永佳.2016.砖混结构废墟救援安全评估BP模型研究[J].灾害学,31(2):10-14.
- 席铮.2005.桥梁评估专家系统[D].武汉:武汉理工大学.
- 杨玉成,王治山,杨雅玲等.1992.城市现有房屋震害预测智能辅助决策系统[J].地震工程与工程振动,12(1):77-89.

## Research on Expert System of Ruins Relief Safety Assessment for Brick-concrete Structure

WANG Dongming<sup>1</sup>, LIU Huan<sup>2</sup>, LI Yongjia<sup>1</sup>

(1. China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China)

(2. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

#### Abstract

Based on the characteristic of ruins relief for brick-concrete structure, we designed the system function, architecture and interface of expert system, and verified and tested the established system by the actual earthquake relief cases. The results show that the established safety assessment expert system for brick-concrete structure have convenient application, and can assist earthquake emergency rescue work.

**Key words:** earthquake rescue; structure ruins; safety assessment; expert system