

文章编号: 1007-6069(2003)03-0117-07

基于经验统计方法的桥梁震害预测辅助决策系统

王东升^{1,2}, 朱敏², 钟江荣²

(1. 大连理工大学 海岸及近海工程国家重点试验室, 辽宁 大连 116024; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 选择场地、结构、地震动和抗震设防 4 大类 18 个因素作为考虑因素, 以国内外桥梁震害预测经验统计方法为主体构成了知识库, 开发了与 GIS 结合的桥梁震害预测辅助决策系统 BSVAS。该系统可初步用于大中城市防震减灾桥梁震害预测工作, 并为基于 GIS 的防震减灾管理系统的更新提供可能。

关键词: 桥梁; 震害预测; 辅助决策系统; 地理信息系统

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A

Aided seismic damage predictim system for bridges using statistical analysis methods

WANG Dong-sheng^{1,2}, ZHU Min², ZHONG Jiang-rong²

(1. state key Lab. of Coastal and offshore Eng., Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, Harbin 150080, China)

Abstract: An aided bridges seismic vulnerability assessment system (BSVAS) that integrated with geographic information system (GIS) is introduced. The knowledge base in BSVAS is mainly consisted of experience of earthquake damage with statistical analysis methods. 18 attributes of the knowledge base that consider effects of site, structure, earthquake ground motion and seismic design code are selected. BSVAS can be used in the work of reducing earthquake disasters of large cities. This will make for the computerized reducing earthquake disaster system based on GIS to be updated.

Key words: bridges; seismic vulnerability assessment; aided decision support system; geographic information system (GIS)

1 引言

桥梁是交通系统的重要元件, 在交通系统防震减灾中处于核心地位。桥梁震害预测可以为交通系统可靠性分析、损失评估以及桥梁加固优先级评价和地震应急决策提供必要的依据, 是城市防震减灾重要的基础性工作之一。

“八五”和“九五”期间, 我国一些大中城市相继建设了基于 GIS 的防震减灾信息管理系统, 由于这些系统缺少智能化的震害预测功能, 其进一步更新和维护将面临困难。另一方面, 防震减灾基础数据信息往往掌

收稿日期: 2003-02-13; 修订日期: 2003-05-06

基金项目: 中国地震局工程力学研究所预研究课题

作者简介: 王东升(1974-), 男, 内蒙古库仑人, 副研究员, 博士, 主要从事结构抗震研究。

握在各个管理部门手中,其提取工作相当困难,更不要说更新。我国著名地震工程学家胡聿贤院士曾深刻指出:“防震减灾工作应与平时管理相结合,否则极易失去生命力”^[1]。若解决上述问题,必须开发与管理相容的智能GIS系统。其关键技术有:一是与管理相结合的防震减灾标准数据库,并被管理部门所应用;二是开发智能震害预测决策系统;三是WebGIS的发展。

本文针对大中城市防震减灾桥梁震害预测需求,基于经验统计方法开发了与GIS结合的震害预测辅助决策系统BSVAS(Bridges Seismic Vulnerability Assessment System)。

2 桥梁震害预测经验统计方法

经验统计法是先根据历史震害经验、桥梁抗震知识及桥梁样本所提供的资料,选择影响桥梁震害的主要因素,再根据大量震害样本进行各影响因素的影响方式和权值的统计回归,建立桥梁震害经验预测公式的一种地震安全评价方法^[2]。

经验统计法不需要复杂计算就可以确定桥梁在未来地震中可能的破坏等级,使用起来经济方便,特别是涉及某个地区或城市大量桥梁需要进行震害预测时。常见的有久保庆三郎方法、日本土木工程学会方法、周神根方法、朱美珍方法、Buckle方法等。本文采用久保庆三郎方法、日本土木工程学会方法、朱美珍方法和Buckle方法中的两种或两种以上方法进行桥梁震害预测。这样做的依据是一方面相当于增加了桥梁震害样本数,另一方面尽管各国桥梁建设情况各异,但震害表现出的相近性远远大于其相异性。一般情况下,久保庆三郎方法和朱美珍方法仅适合于未采取抗震设计的桥梁,日本土木工程学会方法和Buckle方法适用范围则广些。当采用上面两种或两种以上方法进行桥梁震害预测,桥梁震害等级存在明显差异时,可依据桥梁重要性不同,通过工程综合判断或分析方法予以确认。本文以此为基础构成了知识库,并通过人机对话的形式建立了相应推理机构,开发了桥梁震害预测辅助决策系统。

下面将采用的桥梁震害预测方法作一简要介绍:

(1)久保庆三郎方法

久保庆三郎(1982)^[3]统计了遭受严重震害的30座公路桥梁资料,考虑了地震烈度、场地条件、液化、上部结构类型、支座类型、墩台高度、孔数、支承宽度、基础形式、墩台材料10个影响因素,通过定义它们的权系数进行相乘,如果得到的值大于30,则桥梁是危险的,有可能落梁。该方法的基本公式为:

$$D = \prod W_{jk} X_{jk} \quad (1)$$

式中: D 为桥梁震害参考指标, $D \geq 30$ 时,桥梁会发生落梁; W_{jk} 为选择的各类因素权系数; X_{jk} 当第 j 因素第 k 项存在时,为1.0,否则为0.0。

(2)日本土木工程学会方法

日本1986年公路桥梁抗震鉴定提出的最新公路桥梁易损性分析方法是在上述方法基础上根据124座遭受地震破坏的桥梁资料,选择设计规范、上部结构类型、上部结构形式(曲梁桥和直梁桥)、上部结构材料、桥轴线坡度、抗落梁措施、基础种类、桩高、场地条件、液化、基础持力层不均匀性、土层杂质、基础材料、基础种类、地面运动强度等15个影响因素,利用统计学方法得到了经验公式^[4]。该方法上部结构类型中含有斜拉桥和悬索桥,未考虑地震烈度因素,其隐含假定为地震动峰值在0.25g以上。另外,在定性分析基础上还包含了主筋跨中截断和桥墩剪应力的少量计算要求。该方法的基本公式为:

$$D = \prod W_{jk} X_{jk} \quad (2)$$

式中: D 为桥梁震害参考指标, $D \geq 60$ 时,桥梁易损性较高; $60 > D \geq 20$,桥梁易损性中等; $D < 20$,桥梁易损性较低; W_{jk} 为选择的各类因素权系数; X_{jk} 当第 j 因素第 k 项存在时,为1.0,否则为0.0。

(3)朱美珍方法

朱美珍(1990)^[5]根据唐山、海城、通海地震中100多座公路桥梁的震害情况,选择地震烈度、场地类别、地基失效程度、上部结构类型、支座形式、墩台高度、墩台材料、基础形式、桥梁长度等9个因素,建立了公路桥梁震害预测经验公式。如下式所示:

$$D = W_0 \prod_{j=1}^9 \prod_{k=1}^{2或3} W_{jk}^{X_{jk}} \quad (3)$$

式中: D 为桥梁震害参考指标; W_0 为计算系数; W_{jk} 为选择的各类因素权系数; X_{jk} 当第 j 因素第 k 项存在时, 为 1.0, 否则为 0.0。用式(3)进行桥梁震害预测时, 对应于基本完好, 轻微破坏, 中等破坏, 严重破坏的临界 D 值依次为 1.23, 2.20, 3.38 和 4.40。

(4) Buckle 方法

Buckle 等(1995)^[6] 利用美国从 1964 年 Alaska 地震到 1991 年 Costa Rica 地震期间 11 次地震中 114 座桥梁震害资料, 选择地面运动峰值、设计规范、上部结构类型、上部结构外形、跨中铰、桥墩类型、基础类型、墩体材料、规则性、场地条件、液化程度、支座支承长度等 12 个影响因素, 通过多参数回归分析建立了震害指数与影响因子的经验公式, 并指出地面运动峰值、液化程度、设计规范和支座支承长度是影响桥梁震害的最主要因素。在 Buckle 的方法中, 上部结构类型也包括了斜拉桥和悬索桥。该方法的基本公式为:

$$D = \sum W_{jk} - 3.754 \quad (4)$$

式中: D 为桥梁震害参考指标; W_{jk} 为选择的各类因素权系数。用式(4)进行桥梁震害预测时, 对应于基本完好, 轻微破坏, 中等破坏, 严重破坏的临界 D 值依次为 0.5, 1.5, 2.5 和 3.5。

3 桥梁震害预测考虑因素

桥梁震害影响因素取舍对其震害预测结果有很大的影响, 本文希望开发与平时管理相容的震害预测辅助决策系统, 因此首先调研了交通部门使用的“中国公路桥梁管理系统 CBMS (China Bridges Manage System)”的数据情况。在此基础上选择场地(含类别、液化条件、场地均匀性、抗液化措施 4 个因素)、结构(含上部结构、支座、桥墩、基础 4 个项目 10 个因素)、地震动(以烈度表示)、抗震设防(含设防烈度、设计规范、防落梁措施 3 个因素)等 4 大类 18 个因素作为桥梁震害预测考虑的因素。这些考虑因素都可以通过检索 CBMS 系统直接得到或根据提示间接得到。如场地类别判断, 系统规定场地地基条件为硬质基岩、软基岩、部分风化硬质岩、密实卵(砾)石和角砾石为 I 类; 极软质岩、中密卵砾石、砾砂、卵碎石、硬性粘土为 II 类; 砾石、卵石夹粘土、粉土含中细砂和碎石、砂粘土为 III 类; 软土、砂性土、填土为 IV 类。

因选择的影响因素与前面介绍的各个方法已有所不同, 根据原方法考虑的各个因素重新确定了上述 18 个因素的权系数, 如表 1 所示。重新确定权系数的原则是: 原方法已考虑的因素, 取原来值, 详见参考文献^{[3]~[6]}; 原方法未考虑的因素, 对公式(1)~(3)取权系数为 1.0, 对公式(4)取系数为 0.0。这样就可以尽可能保证与原方法的一致性。

4 桥梁震害预测辅助决策系统实现

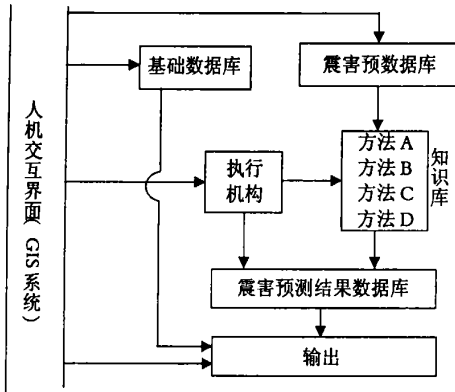
桥梁震害预测辅助决策系统如图 1 所示。该系统基础数据库含桥梁编号、桥梁名称、路线号、路线名、所在地、路等级、桥梁类别、设计荷载、当前荷载、桥梁总长、桥跨组合、最大跨径、桥宽组合、桥面净高、桥梁高度、建桥年代等 16 组数据。主要用途是: (1)编写震害评价报告; (2)建立 GIS 对象的属性数据; (3)为地震灾害损失评估、震后决策分析和积累震害经验服务。震害预测数据库主要包括各个桥梁震害预测需考虑的 18 个因素情况。

桥梁震害预测评价流程如图 2 所示。

基于上述评价过程, 在 Fortran Powerstation 4.0 平台上利用 Fortran90 语言编写了桥梁震害预测分析程序, 并采用 ESRI 公司的 ArcView3.2 软件集成了桥梁震害预测辅助决策系统 BSVAS (Bridge Seismic Vulnerability Assessment System)。ArcView3.2 软件能够方便地开发自己的界面, 并且为外部程序提供有很好的接口, 另外, 其数据标准目前已经成为其它 GIS 软件数据的事实标准, 这就为将来进一步开发和与其它 GIS 系统接口提供了基础。

表1 各方法考虑因素权系数表

方法名称		朱美珍	久保庆三郎	Buckle	日本土木学会		
场 地	场地 类别	I	0.8	0.5	0.188	1.0	
		II	1.0	1.0	0.376	1.2	
		III	1.8	1.5	0.564	2.0	
		IV	2.0	1.8	0.752	2.5	
	液化 条件	液化	1.8	2.0	3.262	2.0	
		可能液化	1.5	1.5	2.330	1.5	
		不液化	1.0	1.0	0.932	1.0	
	场地 均匀性	均匀	1.0	1.0	0.0	1.0	
		不均匀	1.0	1.0	0.0	1.2	
	抗液化 措施	有	0.7	0.7	-0.932	0.7	
无		1.0	1.0	0.0	1.0		
结 构	上部 结构	种 类	简支	1.4	3.0	0.456	1.8
			连续	1.0	2.0	0.342	1.8
			悬臂	1.4	3.0	0.634	1.8
			拱	1.1	1.0	0.228	1.2
		规 则 性	直线或较规则	1.0	1.0	0.357	1.0
			曲线	1.1	1.0	0.874	1.2
			坡桥	1.1	1.0	0.556	1.2
		孔 数	小于2孔(含)	1.0	1.0	-0.228	1.0
	大于2孔		1.2	1.75	0.0	1.0	
	支 座	种 类	板式橡胶支座	1.0	1.0	0.0	1.0
			盆式橡胶支座	1.0	1.0	0.0	1.0
			钢板支座	1.1	1.15	0.0	1.0
	桥 墩	高 度	小于5米	1.0	1.0	0.0	1.0
			大于5米且 小于10米	1.1	1.4	0.0	1.5
			大于10米	1.2	1.7	0.0	2.0
		材 料	混凝土	1.05	1.4	0.102	1.0
			钢筋混凝土	1.0	1.0	0.068	1.0
			圬工砌体	1.1	1.4	0.136	1.0
		形 式	重力式墩	1.0	1.0	0.029	1.0
			单柱墩	1.0	1.0	0.087	1.0
双柱墩			1.0	1.0	0.058	1.0	
多柱墩			1.0	1.0	0.058	1.0	
其它			1.0	1.0	0.029	1.0	
基 础		种 类	天然浅基础	1.0	1.0	-0.048	1.0
	柔性基础		1.0	1.0	-0.024	2.0	
	单排桩基础		1.15	1.4	-0.096	2.0	
	双排桩基础		1.15	1.4	-0.096	1.0	
	多排桩基础		1.15	1.4	-0.096	1.0	
	沉井基础		1.0	1.0	-0.048	1.0	
	材 料	钢筋混凝土	1.0	1.0	0.0	1.0	
		混凝土	1.0	1.0	0.0	1.0	
		圬工砌体	1.0	1.0	0.0	1.0	
	承 台	高桩承台	1.1	1.1	0.0	1.0	
低桩承台		1.0	1.0	0.0	1.0		
地 震 动	地震 烈度	7	1.0	1.0	0.282	1.0	
		8	1.1	1.0	0.423	1.0	
		9	1.2	2.4	0.564	1.0	
抗 震 设 防	设防 烈度	7	1.0	1.0	0.0	1.0	
		8	1.0	1.0	0.0	1.0	
		9	1.0	1.0	0.0	1.0	
		未设防	1.0	1.0	0.0	1.0	
	抗震 设计 规范	78规范以前	1.0	1.2	1.368	4.0	
		78规范	1.0	1.1	0.912	2.0	
		89规范	1.0	1.0	0.456	1.0	
防止落 梁措施	有	0.7	0.6	0.511	1.0		
	无	1.0	1.0	1.523	2.0		



A: 朱美珍方法; B: 久保庆三郎方法; C: Buckle 方法; D: 日本土木工程学会方法

图 1 桥梁震害预测辅助决策系统

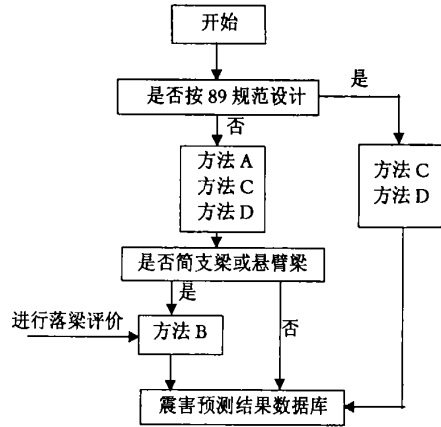


图 2 桥梁震害预测评价流程

BSVAS 系统利用 Avenue 语言开发了自己的封面菜单和功能模块。在系统封面上建有自己的菜单项, 用来调用各个功能模块, 包括桥梁震害预测评价与分析、桥梁基本属性数据和桥梁震害预测结果查看等。

5 系统测试

采用唐山地震时破坏的滦河大桥 (场地条件良好) 和胜利桥 (场地土液化) 对系统进行了测试。

(1) 滦河大桥

滦河大桥为一座 35 孔简支梁桥, 全桥长 789m。主震后, 该桥除东岸引道路面略有下沉外未见到明显震害, 仍旧维持正常通车, 地震烈度为 VIII 度。继 7.8 级地震之后, 当日下午发生 7.1 级余震时, 全桥震毁, 共有 23 孔落梁, 部分墩身倒塌, 倒塌的墩身位于落梁之上。西桥台胸墙撞裂, 东桥台胸墙被梁顶入路堤 22cm~27cm。地震烈度为 IX 度。

利用 BSVAS 得到的滦河大桥震害预测结果如表 2 所示。

表 2 滦河大桥震害预测结果

预测方法	地震烈度		
	7	8	9
朱美珍	中等破坏	中等破坏	中等破坏
久保庆三郎	不会落梁	不会落梁	可能落梁
Buckle	中等破坏	中等破坏	中等破坏
日本土木学会		易损性中等	

从表 2 可以看出不同的预测方法结果较相近, 只有久保庆三郎方法预测到 IX 度会发生落梁破坏。朱美珍方法和 Buckle 方法显示该桥破坏似乎与地震烈度关系不大, 若考虑日本土木工程学会方法 (隐含假定地震动峰值在 0.25g 以上) 认为该桥易损性中等, 说明该桥本身存在一定抗震薄弱环节。

(2) 胜利桥

胜利桥位于唐山市东跨越陡河处, 两孔发生落梁, 落梁的原因是由于软土和轻亚粘土河岸滑移 (河底段已液化), 推动桥台向河心滑动, 使桥孔压缩, 桥墩倾斜、折断。地震烈度为 XI 度。

利用 BSVAS 得到的胜利桥震害预测结果如表 3 所示。

从表 3 同样可以看出不同的预测方法结果较相近, 与我们最初的假定一致。胜利桥震害预测结果与实际震害有一定相似性。

尚需说明的是 BSVAS 目前仅能给出不同经验统计方法的桥梁震害预测结果, 可一定程度上说明该桥

梁地震易损性高或低,从而为防震减灾决策提供参考,这也为针对实际震害进行不同方法的进一步比较分析提供了基础。

表3 胜利桥震害预测结果

评价方法	地震烈度		
	7	8	9
朱美珍	中等破坏	倒塌	倒塌
久保庆三郎	不会落梁	不会落梁	可能落梁
Buckle	中等破坏	严重破坏	倒塌
日本土木学会		易损性高	

6 结束语

桥梁震害预测涉及地震、场地、结构等诸多确定性和不确定性因素,属半结构化问题,需要采用定性和定量相结合的方式加以解决,在当前的技术条件下,开发和研制功能集成和技术集成的智能决策支持系统是解决此类问题的较佳途径。本文仅是这方面初步的探索,需要进一步完善的工作有:

(1)增加桥梁震害预测量分析模块,如加入课题组开发的钢筋混凝土桥墩 Pushover 分析程序,并结合大量的实际算例对不同方法预测结果之间的可比性进行深入探讨。

(2)将开发的桥梁震害预测辅助决策系统 BSVAS 用于实际大中城市防震减灾工作。

致谢:哈尔滨公路局公路管理处刘伟成工程师协助作者完成了“中国公路桥梁管理系统(CBMS)”调研工作,表示感谢。

参考文献:

- [1] 胡聿贤,周锡元.地震工程的跨世纪发展——回顾、展望与建议[A].第五届全国地震工程会议论文集[C],北京:1998.
- [2] 胡勃,袁万城,王君杰等.大型桥梁结构抗震分级设防与安全评定标准[J].世界地震工程,1998,14(1):1-9.
- [3] 久保庆三郎.桥梁的震害预测[J].张尚识译.国外地震工程,1984,(5):1-11.
- [4] Kawashima K.日本公路桥的抗震鉴定和加固[J].杨海荣,郑琦译.国外桥梁,1997,(2):69-77.
- [5] 朱美珍.公路桥梁震害预测[A].林皋主编.第三届全国地震工程会议论文集[C],大连:大连理工大学出版社,1990.
- [6] Buckle I G, Kim S H. A vulnerability assessment model for highway bridges[A]. Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph No. 6. Lifeline Earthquake Engineering, Proceedings of the Fourth U. S. Conference[C], American Society of Civil Engineers, New York, Aug. 1995, pages 493-500.
- [7] 王东升,冯启民.桥梁震害预测方法[J].自然灾害学报,2001,10(3):113-118.
- [8] 陈文伟.智能决策技术[M].北京:电子工业出版社,1998.