

桥梁震害预测方法

王东升¹, 冯启民²

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 青岛海洋大学, 山东 青岛 266071)

摘要: 总结并探索了桥梁震害的预测方法, 包括经验统计法、规范校核法、Pushover 法和大跨度桥梁震害预测方法。通过引入的桥梁分类标准, 建立了桥梁震害预测的一般流程。最后, 结合福州市区重要桥梁震害预测, 简要介绍了各类方法的应用。

关键词: 桥梁; 震害预测; 福州市

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A

Seismic damage assessment methods for bridges

WANG Dong-sheng¹, FENG Qi-min²

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, Harbin 150080, China;

2. Qingdao Ocean University, Qingdao 266071, China)

Abstract: Seismic damage assessment methods for bridges including cable-stayed/suspension bridges are summarized and improved with experience of earthquake damage, seismic code and pushover analysis. Flow chart of seismic damage assessment for bridges based on their importance classification is presented. At last the prediction of damage of bridges in Fuzhou City is illustrated as an example.

Key words: bridge; seismic damage assessment; Fuzhou City

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。

“九五”期间, 作者参加了中国地震局重点项目“大中城市防震减灾示范研究”, 负责完成了东营、泰安、厦门、福州 4 城市部分重要桥梁的震害预测工作。结合该项工作, 总结了国内外桥梁震害预测的发展, 建立了桥梁震害预测方法和震害预测的一般过程, 现介绍给国内同行, 供参考指正。

1 桥梁震害预测方法

桥梁震害预测方法包括经验统计法、规范校核法、Pushover(推倒分析)法和大跨度桥梁定性定量相结合的震害预测方法 4 类。

1.1 经验统计法

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

收稿日期: 2001-02-01; 修订日期: 2001-05-20

基金项目: 地震科学联合基金资助项目(101056)

作者简介: 王东升(1974-), 男, 内蒙古哲里木盟库伦旗人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事桥梁抗震研究。

要因素,再根据大量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^[1]。

久保庆三郎^[2]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、墩台材料等10个影响因素,通过定义它们的易损性指数进行相乘,如果得到的值大于30,则桥梁是危险的,有可能落梁。

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^[3]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(曲梁桥和直桥梁)、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、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的经验公式。该方法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。另外,在其上部结构类型中含有斜拉桥和悬索桥。

周神根^[4]根据唐山地震272座铁路桥梁的震害资料,选定地震烈度、墩高、基础类型、场地液化情况、场地类型、跨径、跨数等7个影响因素,用最小二乘原理进行多元线性回归,建立了铁路桥梁的震害指数预测公式。

朱美珍^[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,建立了公路桥梁的非线性震害预测经验公式。

Buckle等^[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124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主要因素。在Buckle的方法中,上部结构类型也包括斜拉桥和悬索桥。

经验统计法不需要通过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。经验统计法的误差源自于桥梁震害影响因素取舍、回归公式形式、桥梁样本数、影响因素相互作用等几个方面。新近发展起来的基于神经网络和GIS数据库的桥梁震害预测方法^[7-9]由于可以在一定程度上降低上述误差,预计将会得到充分的发展。在现有条件下,为提高经验统计法的预测精度,可以同时采用久保庆三郎方法、日本公路桥梁易损性分析方法、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,但使用中应注意各国规范的不同,不可生搬硬套。这样做的依据是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,同时这样做也不会增加多少工作量。一般情况下,久保庆三郎方法和朱美珍方法仅适用于未采取抗震设计的桥梁,日本公路桥梁易损性分析方法和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,得到的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判定。

1.2 规范校核法

规范校核法是先依据《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)中的有关规定计算桥梁主要结构构件的地震荷载,然后将地震荷载效应与恒载效应(重力)组合,得到结构构件的内力,并与结构构件的极限荷载(抗力)相比较,从而给出桥梁结构的震害等级。该方法的一般公式为

$$K = \frac{\gamma R_d(R/\gamma_m)}{S_d(G,E)} \quad (1)$$

式中, K 为结构抗震安全系数; γ 为桥梁现状折减系数,主要考虑桥梁的现状是否良好和构造措施是否完善, $\gamma=0.5 \sim 1.0$; R_d 为按极限状态法计算的结构抗力函数; R 为材料强度值; γ_m 为材料安全系数, $\gamma_m=1.0 \sim 1.5$; S_d 为荷载效应函数; G 为永久荷载; E 为结构地震荷载。

上式原则上适用于良好地基或采取了较完善的抗液化措施的软弱地基上的桥梁震害预测。在液化场地而桥梁结构又未采取抗液化措施时,需要考虑液化影响,可以通过修正震害指数的经验公式对震害预测结果进行修正:

$$D_j = R_j D_j^0 \quad (2)$$

式中: D_j 为修正后的结构在 j 度烈度下的震害指数, 对应完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁灭的均值分别为 1, 2, 3, 4, 5; R_j 为震害指数修正系数, 系通过对 593 座公路桥梁的震害统计资料分析得到^[7], 见表 1。对于采取了不完全抗液化措施的桥梁结构, 表中数值可酌减; D_j^0 为 j 烈度条件下依据公式 (1) 计算得到的结构震害指数, 与结构抗震安全系数 K 可近似取为分段线性插值。

结构抗震安全系数 K 、结构震害指数 D_j 与桥梁震害等级的对应关系见表 2。

表 1 震害指数修正系数 R_j

结构形式	7度	8度	9度
单跨	1.25	1.50	2.50
多跨	1.50	2.00	2.50

表 2 结构抗震安全系数 K 、结构震害指数 D_j 与震害等级的关系

安全系数 K	$K \geq 1$	$0.8 \leq K < 1$	$0.55 \leq K < 0.8$	$0.4 \leq K < 0.55$	$K < 0.4$
震害指数 D_j	$D_j \leq 1.5$	$1.5 \leq D_j < 2.5$	$2.5 \leq D_j < 3.5$	$3.5 \leq D_j < 4.5$	$D_j \geq 4.5$
破坏等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁灭

规范校核法计算公式与现行规范一致, 易于工程技术人员掌握和应用, 但由于受规范认识局限性和破坏准则的限制, 仅能隐晦地反映钢筋混凝土结构延性抗震要求。因缺少统计数据, 材料的真实强度往往以名义强度代替, 从而带来误差。从总体上看, 规范校核法属于半经验半分析的震害预测方法。

1.3 Pushover 方法

Pushover 分析方法是通过对结构施加单调递增水平荷载来进行分析的一种非线性静力分析方法。该方法通常将相邻伸缩缝之间的桥梁结构当作空间独立框架考虑, 上部结构通常假定为刚性。分析的初始阶段是对单独的排架墩在所考虑的方向上(顺桥向或横桥向)进行独立的倒塌分析, 以期获得构件在单调递增水平荷载作用下的整个破坏过程及变形特征。之后, 整个框架的分析将桥墩刚度模拟为非线性弹簧, 计算出整体框架的初始刚度中心、横向刚度和转动刚度以及质心处的等效刚度。在框架质心处, 通常是上部结构的质心, 施加单调递增的水平力, 并且随着框架非线性发展的程度, 不断调整各个桥墩的刚度和结构的刚度, 直至结构达到最终极限状态为止。文献[10]、[11]和[12]对此进行了详细介绍, 不再赘述。

Pushover 方法系建立在非线性静力分析基础之上, 通过结构的非线性变形能力, 评价它的抗震性能, 并且可以给出结构的破坏倒塌机制, 从而发现结构的抗震薄弱环节, 与通常的非线性动力分析相比, 具有计算简单、结果明确的优点, 可方便地用于评估钢筋混凝土桥墩的延性抗震能力和伸缩缝处的可能最大地震相对位移。

1.4 大跨度桥梁震害预测

从总体上看, 大跨度桥梁结构(系杆拱桥、斜拉桥、悬索桥)在地震中都未曾发生过严重破坏或倒塌, 只是在引桥或是在支承系统或局部杆件发生破坏。这一方面可能由于人们对大跨度桥梁的重要性有足够重视, 在设计中提高了设防标准并进行了专门研究, 增强了结构抗震能力; 另一方面, 大跨度桥梁大多处在长周期范围, 地震时主要是变形控制, 引桥(相对较刚)、桥梁支座系统或局部杆件的连接不能适应大位移而导致损害^[13]。鉴于此, 建立了定性定量相结合的大跨度桥梁震害预测方法。

(1) 大跨度桥梁抗震能力的定性评价

大跨度桥梁抗震能力的定性评价主要考虑 6 个因素: 地震烈度、场地条件、基础构造、抗震设防、支座构造、结构体系。具体分述如下:

1) 位于坚硬场地上的大跨度桥梁, 在地震烈度不高于设防烈度 1 度以上时, 基本完好; 在高烈度条件下, 塔梁固接体系的斜拉桥、使用钢支座的大跨度桥梁、大跨度连拱桥会发生轻微破坏。

2) 位于软土地基上的大跨度桥梁, 在地震烈度不高于设防烈度时, 基本完好; 地震烈度高于设防烈度 1 度时, 若桩基础满足《构筑物抗震设计规范》(GB 50191-93)的构造要求, 基本完好, 否则塔梁固接体系的斜拉桥、使用钢支座的大跨度桥梁、大跨度系杆拱桥会发生轻微破坏; 更高的烈度条件下, 大跨度桥梁会发生基础移位、支座损坏、局部杆件压屈、构件连接部位钢筋混凝土裂缝等中等破坏现象。

大跨度桥梁抗震能力的定性评价还可以采用前面提到的经验统计方法, 如 Buckle 方法和日本桥梁地震易损性评价方法。

(2)大跨度桥梁抗震能力的定量评价

主要从3个方面评价:

1)主桥与引桥连接处支承面宽度是否足够,抗震构造措施是否合理。主桥位移反应可采用反应谱方法或时程法进行分析。

2)桥台的抗震稳定性。可利用《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)提供的方法评价或采用其它成熟方法。

3)塔根截面的强度和延性抗震性能。

考虑到桥梁抗震安全性评价和桥梁抗震设计不同,它并不要求总是作出偏于保守的决策,建议用于大跨度桥梁抗震能力定量评价的地震动超越概率为100a超越概率10%(重现期为950a)。输入地震波可采用“3+1”模式,即3条与场地条件相近的天然地震波和1条人工地震波。

最后,综合(1)、(2)两项结论,给出大跨度桥梁的震害等级。

大跨度桥梁震害影响因素复杂,震害预测工作量大,且需要专业分析软件。考虑到大跨度桥梁至今为止在地震中尚未曾发生严重破坏或坍塌,作者建议不必对大跨度桥梁进行震害预测,或仅进行定性评价,除非满足下述条件之一:1)抗震设防标准偏低;2)桥梁存在明显抗震缺陷;3)业主提出特殊要求。

2 桥梁震害预测流程

依据桥梁重要性的不同,将桥梁划分为甲、乙、丙、丁4类,见表3。

表3 桥梁分类

Table 3 Classification of bridges

类别	桥 梁
甲类	大跨度桥梁,包括系杆拱桥、斜拉桥、悬索桥
乙类	《公路工程抗震设计规范》中重要性系数 ≥ 1.3 的桥梁和《城市桥梁抗震设计规范》中的甲 _B 类桥梁和大跨度桥梁引桥
丙类	《公路工程抗震设计规范》中, $1.0 \leq$ 重要性系数 < 1.3 的桥梁和《城市桥梁抗震设计规范》中的乙类桥梁
丁类	除甲、乙、丙3类桥梁以外的其它桥梁

桥梁震害预测流程见图1。

3 应用实例:福州市区重要桥梁震害预测

福州是福建省省会,位于闽江下游。对福州市区进行震害预测的重要桥梁包括市区跨越闽江及乌龙江的6座主要桥梁和1座互通式城市立交桥,它们分属甲类和乙类桥梁。这些桥梁的基本情况见表4。桥梁震害预测方法和预测结果列于表5。

震害预测表明:

(1)地震烈度为9~10度时,抗震能力弱的洪山大桥、闽江大桥和鳌峰大桥会发生严重破坏,甚至倒塌。由于这3座桥梁是出入福州市区的门户,此时福州市区对外联系几乎会处于中断,但这种情况发生的可能性仅是在福州市区发生与日本阪神地震相类似的直下型强烈破坏性地震时。从阪神地震交通系统震害经验看,上述震害预测结果与神户市对外交通几乎中断是一致的。因此,对于具有与神户市地震地质背景相近的城市,宜

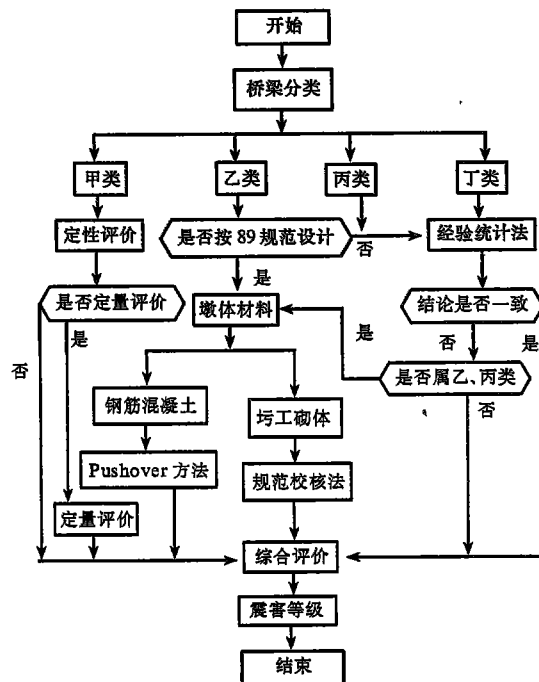


图1 桥梁震害预测流程

Fig.1 Flow chart of seismic damage assessment for bridges

抓紧开展桥梁震害预测和抗震加固工作。

(2) 引桥与主桥相比抗震能力较低。建议今后在震区桥梁抗震设计中引桥与主桥采用同样的设防标准, 否则地震时引桥的破坏同样会导致主桥丧失使用功能。

表4 福州市区重要桥梁基本情况
Table 4 Main bridges in Fuzhou City

桥梁名称	建造年代	结构形式	跨径/m	上部结构	桥墩	基础	抗震设防烈度	场地类型	现状
洪山大桥	1985	T型刚构	110	预应力混凝土桁架拱+挂梁	重力式混凝土桥墩	沉井		II	桥面铺装局部损坏
三县州大桥	1999	独塔单索面斜拉桥	238	箱梁	钢筋混凝土倒Y形塔	钻孔灌注桩	8	III	良好
解放大桥	1996	中承式系杆拱	76.3	“哑铃形”钢管混凝土拱肋	钢筋混凝土实体桥墩	钻孔灌注桩	8	II	良好
闽江大桥 ^①	1968	T型刚构	50	预应力混凝土悬臂梁+挂梁	预应力混凝土土薄壁墩	钻孔灌注桩		II	桥面铺装局部损坏, 桩基有损伤
鳌峰大桥	1993	连续梁桥	70	箱梁	重力式混凝土桥墩	钻孔灌注桩	7	II	桥面铺装局部损坏
乌龙江大桥	1996	连续梁桥	110	箱梁	钢筋混凝土门式桥墩	钻孔灌注桩	7	III	良好
五里亭立交桥	1993	3层互通式立交桥	20	箱梁	钢筋混凝土实体墩	钻孔灌注桩	7	II	良好

① 该桥曾于1991年进行过拓宽改造, 拓宽部分与旧桥相比抗震能力较高, 故本次震害预测选择原旧桥作为预测对象。

表5 福州市区重要桥梁震害预测方法和结果
Table 5 Seismic damage assessment methods and results for main bridges in Fuzhou City

桥梁名称	震害预测方法	地震烈度				
		6	7	8	9	10
洪山大桥	经验统计法	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
三县州大桥	主桥 定性定量评价	基本完好	基本完好	基本完好	基本完好	轻微破坏
	引桥 Pushover方法	基本完好	基本完好	基本完好	中等破坏	严重破坏
解放大桥	主桥 定性定量评价	基本完好	基本完好	基本完好	轻微破坏	中等破坏
	引桥 Pushover方法	基本完好	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏
闽江大桥	经验统计法	中等破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏	毁坏
鳌峰大桥	主桥 规范校核法	基本完好	基本完好	轻微破坏	严重破坏	毁坏
	引桥 Pushover方法	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
乌龙江大桥	主桥 Pushover方法	基本完好	基本完好	基本完好	轻微破坏	严重破坏
	引桥 Pushover方法	基本完好	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏
五里亭立交桥	Pushover方法	基本完好	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏

注: 表中“基本完好”对既有损伤桥梁, 如洪山大桥是指在指定地震烈度条件下, 在现有损伤基础上发生进一步破坏的可能性很小。

4 结语

桥梁震害预测工作在我国开展已10年有余。本文对各类桥梁震害预测方法进行了系统总结和完善的, 通过引入桥梁震害预测分类, 建立了桥梁震害预测一般流程, 不再区分单体震害预测和群体震害预测。从桥梁震害预测本质上看, 这是属于近似地评估桥梁地震易损性的一类方法, 因此作者通过联合运用各类经验统计法, 扩大了经验统计法的应用范围, 这与传统认为经验统计法过于粗略, 仅适合于群体震害预测观点不同。对于分析类方法, 一方面限制了其应用范围, 另一方面区分墩体材料而分别采用规范校核法和Pushover方法, 以更好地反映结构的延性抗震能力和位移要求。以上考虑主要是基于桥梁震害预测目的、现有震害认识和经济性三者的统一。应当指出, 实际桥梁震害影响因素复杂, 上述方法还存在着诸

多不确定性, 因此尚需结合工程经验判断加以解决。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 周神根, 王天威, 杨春环. 铁路桥梁震害简易预测法[A]. 抗震防灾对策[C]. 开封: 河南科学技术出版社, 1988. 276-283.
- [5] 朱美珍. 公路桥梁震害预测[A]. 林皋. 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. 1797-1802.
- [6] Buckle I G, Kim S H. A vulnerability assessment modal for highway bridges[A]. New York: Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, Proceedings of the Fourth U.S. Conference[C]. American Society of Civil Engineerings, 1995. 493-500.
- [7] 朱昱, 赵成刚, 刘勇生. 神经网络在桥梁震害预测中的应用[A]. 冯启民. 第四届全国地震工程会议论文集[C]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 1994. 7-32 ~ 7-37.
- [8] 叶燎原, 刘本玉. 震害预测的人工神经网络方法及其应用[J]. 工程力学(增刊), 2000, 1:19-28.
- [9] Morikawa H, Takada S. Damage analysis and probabilistic diagnosis of bridge piers based on GIS database for the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake[A]. Hu Yuxian, Takada Shiro, Leon Wang R L. 中美日三边生命线地震工程研讨会论文集[C]. 昆明: 1998.75-66.
- [10] 普瑞斯特雷, M J N. 塞勃勒 F, 等. 桥梁抗震设计与加固[M]. 袁万城, 等译. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [11] 王东升, 翟桐, 郭明珠. 利用 Push-over 方法评价桥梁的抗震安全性[J]. 世界地震工程, 2000, 16(2):47-51.
- [12] 王东升, 郭恩栋, 柳春光. 钢筋混凝土圆形截面柱式桥墩抗震性能评价[J]. 世界地震工程, 2001, 17(1):98-102.
- [13] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [14] 范立础. 城市桥梁抗震设计规范的若干问题[J]. 工程力学(增刊), 2000, 1:74-85.
- [15] 翟桐, 王东升. 福州市区重要水闸、桥梁震害预测[R]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2000.
- [16] 黄龙生, 刘广信. 道路交通系统的震害预测[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(1):86-97.
- [17] 黄龙生, 姜素珍. 公路桥梁震害损失预测的研究[R]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 1995.
- [18] 张维岳, 王菁, 高小旺, 等. 唐山市桥梁抗震能力分析[A]. 城市与工程防灾基础研究论文集[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1997. 2117-222.
- [19] 杨新宝. 钢筋混凝土桥梁抗震性能评估与加固[D]. 上海: 同济大学, 1997.
- [20] JTJ004-89, 公路工程抗震设计规范[S].
- [21] GBJ111-87, 铁路工程抗震设计规范[S].
- [22] GBJ50191-93, 构筑物抗震设计规范[S].
- [23] TB10116-99, 铁路桥梁抗震鉴定与加固技术规范[S].