

文章编号:1671-6833(2007)01-0079-04

# 基于 WBS 的桥梁结构损伤度模糊综合评估

李清富, 焦美菊, 刘建华

(郑州大学 环境与水利学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 桥梁损伤评估是公路养护管理的重要内容. 作者在前人研究成果的基础上, 将 WBS 法、损伤度概念和模糊评估原理有机地结合在一起, 建立了一种基于 WBS 的桥梁结构损伤度模糊综合评估模型, 并给出了应用该模型的具体计算步骤. 该模型概念明确, 系统性和条理性强, 计算简便, 所得的结论更符合工程实际, 并便于工程决策的科学制定.

**关键词:** WBS; 损伤度; 模糊评估; 桥梁

**中图分类号:** U 445.7 **文献标识码:** A

## 0 引言

由于车辆荷载、不利环境、各种人为及自然灾害等的共同影响, 大量的桥梁结构在服役期间普遍存在承载力下降、正常使用功能不满足规范要求的情况. 对在役桥梁结构进行适时定期的检查, 正确评估桥梁的损伤状况及各项技术指标, 及时发现问题并采取正确的维修养护措施是公路养护管理部门的一项重要工作. 其中, 对在役桥梁结构的科学评估是该项工作的中心内容, 也是制定正确工程决策的前提和依据. 笔者将在前人研究的基础上, 探讨一种基于 WBS (Work Breakdown Structure) 的桥梁结构损伤度的模糊综合评估方法, 以期给出一种更科学合理、符合工程实际的评估结果供决策者参考.

## 1 WBS 方法简介

关于 WBS 的定义, 最早可以从美国国防部国防系统开发工作手册中得到解释: 即工作分解结构(WBS)是一个以产品为中心的层次体系, 由硬件、软件、服务和资料组成<sup>[1]</sup>. 目前 WBS 被国际标准化组织定义为项目范围管理工具, 其目的是直接按层次把项目分解成子项目, 子项目再分解成更小的、更易操作管理的工作单元. WBS 作为项目管理的基础性工作, 遵循整体性、系统性和可追溯性的原则, 一般要明白工作结构、单元定义、逻辑关系和编码 4 个要素<sup>[2]</sup>. WBS 最终分解结果为

一棵树, 各个子树称之为单元模块, 模块之间有相互的独立性.

由于桥梁结构的复杂性, 桥梁评估作为一个评估项目, 包含了许多工作内容和繁杂的监测项目. 因此, 用 WBS 方法对桥梁评估系统进行结构层次的分解, 不仅能大大提高评估的清晰度、条理性和评估效率, 而且能使评估结果更趋合理和直观. 按 WBS 法的桥梁结构评估系统分解图式见图 1 所示<sup>[3]</sup>.

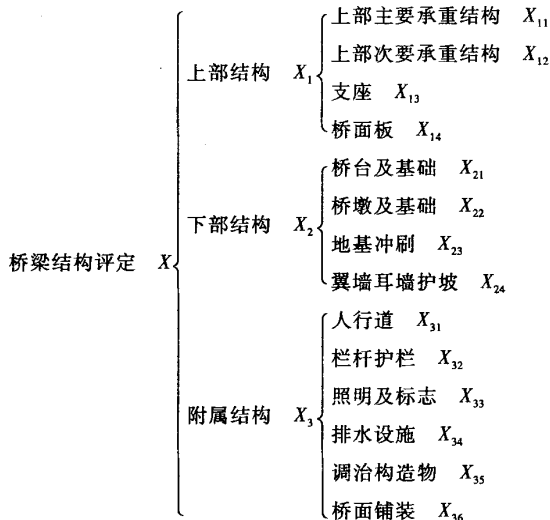


图 1 桥梁结构的 WBS 分解图

Fig. 1 The WBS decomposition chart of the bridge structure

收稿日期:2006-09-13;修订日期:2006-11-15

基金项目:河南省高校创新人才基金

作者简介:李清富(1966-),男,河南林州人,郑州大学教授,博士,主要从事工程结构健康诊断技术研究.

## 2 基于 WBS 的桥梁结构损伤度模糊综合评估

### 2.1 损伤度概念的建立

结构损伤对结构的安全性、适用性和耐久性都会产生不利的影响,至今人们还没有找到同时度量损伤状态和安全状态的指标<sup>[4]</sup>.桥梁的安全状态是在得出桥梁一定的损伤状态后推导得到的.《公路养护技术规范》<sup>[5]</sup>中提出了用结构损伤度  $DV$  (Damage Value) 来度量结构或构件的损伤

程度,其取值范围  $0 \leq DV \leq 1$ . 当  $DV = 0$  时,表示结构或构件处于完全无损状态;当  $DV = 1.0$  时,表示结构或构件已处于完全损坏且不能承受荷载的状态.用结构损伤度作为结构或构件损伤程度的度量,一方面符合专家评判的习惯,易为领域专家接受;另一方面可使计算简化,将结构损伤程度量化,例如将某一指标划分为“完好”、“良好”、“较好”、“一般”、“较差”、“极差”等,并相应地赋予 0, 1, 2, 3, 4, 5 分值,具体评分规则,可按规范文件执行<sup>[5]</sup>(见表 1).

表 1 桥梁部件缺损状况评定方法

Tab. 1 Assessment method for the defective status of the bridge's structure parts

缺损状况及标度			组合评定标度				
缺损程度	小→大						
	少→多		0	1	2		
	轻度→严重						
缺损对结构使用	无、不重要	0	0	1	2		
功能的影响程度	小、次要	1	1	2	3		
	大、重要	2	2	3	4		
以上两项评定组合标度			0	1	2	3	4
缺损发展变	趋向稳定	-1		0	1	2	3
化状况修正	发展缓慢	0		1	2	3	4
	发展较快	+1	1	2	3	4	5
最终评定结果			0	1	2	3	4
			完好	良好	较好	较差	坏的
							危险

说明:“0”表示完好状态,或表示没有设置的构造部件,如调治构造物;“5”表示危险状态,或表示原无设置,而调查表明需要补设的部件.

### 2.2 损伤度模糊评估的一般原理和步骤

桥梁评估是一个复杂的系统问题,评价过程涉及到很多因素,有定量因素,也有定性因素,并且很多因素具有模糊性,因此,采用模糊评估模型更符合工程实际.模糊评估的一般原理和步骤如下<sup>[6]</sup>:

#### 2.2.1 因素论域的建立

按 WBS 法的结构分解图建立因素论域并形成多级模糊评价因素论域,如图 1 所示:

$$X = \{X_1, X_2, X_3\} \quad (1)$$

$$X_1 = \{X_{11}, X_2, X_{13}, X_{14}\} \quad (2)$$

$$X_2 = \{X_{21}, X_2, X_{23}, X_{24}\} \quad (3)$$

$$X_3 = \{X_{31}, X_{32}, X_{33}, X_{34}, X_{35}, X_{36}\} \quad (4)$$

#### 2.2.2 等级域的建立

对评估对象可能做出的各种评判集合的总体称为评语集,笔者采用等级制作为桥梁评判的结果,所以评语集构成等级域.对于桥梁等级域的建立,《公路养护技术规范》<sup>[5]</sup>主要依据病害或缺陷的严重程度,以及对现行规范的满足程度,采用了

5 级制的评定方法.具体定义为:A 级,满足设计规范要求;B 级,略低于设计规范要求,但不影响正常使用,一般可不作处理;C 级,局部不满足设计规范要求,已影响正常使用,应进行维修;D 级,不满足设计规范要求,但还有一定的安全储备,不至于立即发生危险,因采取维修加固措施;E 级,严重不满足设计规范要求,桥梁处于危险状态,随时有发生意外的可能,必须立即采取安全措施.

#### 2.2.3 等级隶属函数的建立

等级隶属函数的选择是评估结果合理性的重要影响因素.在工程实践中,常采用典型函数的形式建立等级隶属函数.当以损伤度作为衡量桥梁结构破损状态的指标时,等级隶属函数可采用以下形式<sup>[7]</sup>:

$$\mu = \begin{cases} 10(DV - DV_{i1}) & (DV_{i1} < DV \leq DV_{i2}) \\ 1 & (DV_{i2} < DV \leq DV_{i3}) \\ 10(DV_{i4} - DV) & (DV_{i3} < DV \leq DV_{i4}) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $DV_{i1} \sim DV_{i4}$  的取值见表 2,等级隶属函数曲

线如图 2 所示。

表 2  $DV_{i1} \sim DV_{i4}$  的取值表  
Tab. 2 Span of the  $DV_{i1} \sim DV_{i4}$

	A 级	B 级	C 级	D 级	E 级
$DV_{i1}$	—	0.15	0.35	0.55	0.75
$DV_{i2}$	0	0.25	0.45	0.65	0.85
$DV_{i3}$	0.15	0.35	0.55	0.75	1
$DV_{i4}$	0.25	0.45	0.65	0.85	—

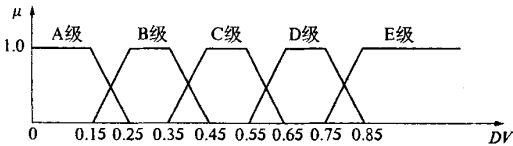


图 2 等级隶属函数曲线

Fig. 2 The curve of the grade function

2.2.4 权重向量的确定

在桥梁结构损伤评估中,不同评估因素对评估结果的影响程度是不同的.为此需要确定不同评估因素及同一评估因素的不同指标在评估中所占的权重数.常用的权重确定方法有基于确定型 AHP 法的传统两两比较法<sup>[8]</sup>和基于不确定型判断矩阵的权重计算法<sup>[9]</sup>.两种方法的基本原理是相同的,即首先按照一定的重要程度的约定构造判断矩阵,然后检验所构造的矩阵是否满足一致性要求,满足一致性检验的判断矩阵就可以采取各自相应的计算方法计算权重向量.

2.2.5 桥梁损伤度的计算

根据表 1 给出的桥梁构件缺损状况评定方法和规范[5],给出最低层评价因素的标度值  $ER_{ij}$ ,  $ER_{ij} \in [0, 5]$ , 则

$$DV_{ij} = ER_{ij} / 5 \tag{6}$$

设不同评估因素的权重分别为  $A = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$ ,  $\omega_i = \{\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in_i}\}$  那么,通过逐层递推的方法可求得桥梁总体损伤度  $DV$

$$DV = \sum_{i=1}^3 \omega_i DV_i \tag{7}$$

$$DV_i = \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{ij} DV_{ij} \tag{8}$$

2.2.6 桥梁技术等级的确定

根据  $DV$  值,代入等级隶属函数,计算  $DV$  值属于等级域的隶属度向量

$$\mu = (\mu_A, \mu_B, \mu_C, \mu_D, \mu_E) \tag{9}$$

按最大隶属度原则确定桥梁的技术等级.

3 应用举例

某桥梁结构已服役 35 年,期间未经过大的修补.由于道路扩建的需要,要求对该桥梁的技术状况进行评估.评估过程和评估结果见表 3.表中第 1 列为按 WBS 法给出的评估因素域以及按 AHP 法给出的各因素权重(见括号内数字);第 2 列为评估专家组根据规范给出的各个评价因素的损伤标度;第 3 列为按式(6)计算出的损伤度值;第 4 列为按式(8)计算出的一级评价因素的损伤度;第 5 列为按式(7)计算的桥梁总体损伤度.

表 3 桥梁损伤评估结果表  
Tab. 3 The results in the bridge of assessment example

评价因素及权重		二级评价因素 的损伤标度 $ER_{ij}$	二级评价因素的 损伤度 $DV_{ij}$	一级评价因素 的损伤度 $DV_i$	总体损伤度 $DV$
$X_1(0.35)$	$X_{11}(0.50)$	2.6	0.52	0.522	0.537
	$X_{12}(0.20)$	2.8	0.56		
	$X_{13}(0.18)$	2.5	0.50		
	$X_{14}(0.12)$	2.5	0.50		
$X_2(0.55)$	$X_{21}(0.39)$	2.7	0.54	0.537	
	$X_{22}(0.41)$	2.6	0.52		
	$X_{23}(0.16)$	2.9	0.58		
	$X_{24}(0.04)$	2.5	0.50		
$X_3(0.10)$	$X_{31}(0.08)$	2.9	0.58	0.591	
	$X_{32}(0.16)$	2.7	0.54		
	$X_{33}(0.20)$	3.2	0.64		
	$X_{34}(0.24)$	2.8	0.56		
	$X_{35}(0.20)$	2.8	0.56		
	$X_{36}(0.12)$	3.5	0.70		

根据  $DV$  值,按式(5)及图 2 确定的该桥梁损伤度等级隶属度向量为

$$\mu = (\mu_A, \mu_B, \mu_C, \mu_D, \mu_E) = (0, 0, 1, 0, 0)$$

根据最大隶属度原则可知,该桥梁属于 C 级,即局部不满足设计规范要求,已影响正常使用,应进行维修。

#### 4 结束语

将损伤度的概念引入桥梁损伤评估中,将定性指标定量化,使得评估工作简单易行,并且易于掌握,而将 WBS 方法、损伤度以及模糊评估相结合,更是增加了评估工作的条理性和系统性,使得桥梁评估更加科学,评估结果更加直观,为制定正确的养护管理决策提供了依据。该方法对其它复杂结构的损伤评估也具有一定的借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 徐森,段建中. WBS 方法在工程项目管理中的应用研究[J]. 建筑经济,2003(9):40-42.
- [2] 卜良桃,毛晶晶. 基于 WBS 与多层次模糊综合评估的桥梁检测评估方法的研究[J]. 中南公路工程,2005,30(3):81-85.
- [3] 江萍,成虎. 施工项目结构分解(WBS)方法及准则研究[J]. 东南大学学报,2000,30(4):105-108.
- [4] 徐家云,何晓明,张俊,等. 模糊理论在桥梁评估中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2003,25(7):38-41.
- [5] JTJ073-96. 公路养护技术规范[S].
- [6] 肖盛燮,王平义,吕恩琳. 模糊数学在土木与水利工程中的应用[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [7] 王永平,张宝银,张树仁. 桥梁使用性能评估专家系统[J]. 中国公路学报,1996,9(2):62-67.
- [8] 夏绍玮,杨家本,杨振斌. 系统工程概论[M]. 北京:清华大学出版社,1995.
- [9] 樊治平,潘德惠. 不确定型判断矩阵权重计算的一种实用方法[J]. 系统工程,1996,14(2):57-61.

### Fuzzy Comprehensive Assessment of Bridge Structure's Damage Value Based on WBS

LI Qing-fu, JIAO Mei-ju, LIU Jian-hua

(School of Environment and Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The evaluation and assessment of the damage in bridge structures is a significant component in the maintenance of the bridge structures. Based on the results of the research of predecessors, a fuzzy comprehensive assessment model, which combines WBS method, conception of damage value and fuzzy assessment, and is based upon WBS of the bridge damage, is introduced in this paper. It also presents the process of calculation in the application of this model. The conclusions derived from this modal, with specific conception, are in more agreement with the practice. It also makes it convenient for the engineers to make scientific conclusions.

**Key words:** work breakdown structure(WBS); damage value; fuzzy assessment; bridge