

# 钢管混凝土拱桥上部结构综合评价方法

黄 侨<sup>1,2</sup>, 唐海红<sup>1</sup>, 林阳子<sup>3,4</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 桥梁工程研究所, 哈尔滨 150090, qhuanghit@126.com; 2. 东南大学 桥梁与隧道研究所, 南京 210096;  
3. 江苏省交通科学研究院股份有限公司, 南京 210096; 4. 长大桥梁健康检测与诊断技术交通行业重点实验室, 南京 211112)

**摘 要:** 为了合理地确定钢管混凝土拱桥上部结构的养护、维修加固方案, 考虑钢管混凝土拱桥上部结构的特点对其缺损状态综合评价方法进行研究. 通过建立缺损钢管混凝土拱桥上部结构多层次评估模型, 研究模型中各元素的建议初始权重; 构造正态关联函数计算确定无下属层元素评价指标与相应各评价等级的关联度, 并考虑指标层及以下各元素的缺损状态进行权重修正计算; 同时与《公路桥涵养护规范》统一, 采用关联度及部件评定标度共同表征桥梁的缺损状态. 提出针对钢管混凝土拱桥上部结构的评价指标体系和成套评估方法. 提出方法能较准确地评价钢管混凝土拱桥技术状态, 为桥梁养护、决策提供科学依据.

**关键词:** 桥梁工程; 综合评估; 层次分析法; 缺损状态; 关联度; 权重修正

中图分类号: TU 448.22

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0115-04

## Comprehensive method for evaluation on superstructure of CFST arch bridge

HUANG Qiao<sup>1,2</sup>, TANG Hai-hong<sup>1</sup>, LIN Yang-zi<sup>3,4</sup>

(1. Institute of Bridge Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, qhuanghit@126.com;  
2. Institute of Bridge and Tunnel Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Jiangsu Transportation Research Institute CO, LTD, Nanjing 210096, China; 4. Key Laboratory of Large-span Bridge Health Inspection & Diagnosis Technology Ministry of Communications PRC, Nanjing 211112, China)

**Abstract:** In order to establish a reasonable maintenance and strengthening scheme for CFST arch bridge, a comprehensive method for evaluating the damage conditions of the bridge is studied with consideration of its construction features. A multi-level evaluation model for the damaged CFST arch bridge is established, and evaluation indices in the rating standards are defined primarily in the model. A normal relational function is constructed to calculate the relational degree about the evaluation indices of each element, which has no sub-level elements to each rating grade. When evaluating the elements in sublevel or index level of the model, the weights of elements pertaining to one element are adopted by taking account of their deterioration degree. The damage conditions of bridge are characterized by relational degree and element evaluation scale, which is uniform with the Code for Maintenance of Highway Bridges and Culvers. The evaluation index system and a set of evaluation methods about the superstructure of CFST arch bridge are brought forward. The methods can evaluate the working condition of CFST arch bridge and offer a scientific basis for bridge maintenance and decision making.

**Key words:** bridge engineering; comprehensive evaluation; AHP method; damage condition; relational degree; weight modification

我国修建了大量的钢管混凝土拱桥, 这些桥梁在风雨、冰冻和温度变化等自然因素的侵蚀下,

有些已出现不同程度的损伤, 部分桥梁的承载能力已大大降低甚至出现坍塌的情况. 某些钢管混凝土拱桥的结构性能发生退化而逐渐演变为危桥, 对这类桥梁亟需综合评定, 以便采取相应的技术养护或改造<sup>[1-4]</sup>. 本文运用层次分析法, 建立缺

收稿日期: 2009-04-24.

作者简介: 黄 侨(1958—), 男, 教授, 博士生导师.



$$W_{i,j} = \sum_{j'=1}^L W_{i+1,j'}, i = 1, 2, 3, 4.$$

式中:  $j'$  为  $j$  元素下属各元素;  $L$  为  $j$  元素下属元素个数;  $i$  分别代表目标层、项目层、分项层和指标层; 且最终目标层总权重

$$W_1 = 100.$$

## 2.2 关联度及其应用

由于桥梁结构中各构件的材料、几何特性及其退化模型等的不定性, 因此很难做到对在役钢管混凝土桥梁或其构件性能的准确评价<sup>[6-7]</sup>. 故可将模糊物元分析理论中的“关联度”概念用做桥梁评价模型中各个元素或构件评价的基本参数.

从以往研究可知结构材料性质等因素基本服从正态分布<sup>[8-9]</sup>. 进而分析可知影响元素评价指标关联度的因素有: 评价指标实测值到各评价等级区间的距离; 相应等级的区间大小. 因此构造以下正态关联函数进行关联度计算, 并将关联度标准化, 即令元素各评价等级的关联度之和等于 1. 有:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-x_j)^2}{2\sigma^2}\right).$$

设第  $j$  个元素评价指标实测值  $x_j$  对于第  $n$  个等级的关联度为  $K'_{jn}$ , 按下式计算:

$$K'_{jn} = \begin{cases} (b_{jn} - a_{jn})(f(a_{jn}) + f(\frac{a_{jn} + b_{jn}}{2}) + f(b_{jn}))/3, & x_j \notin (a_{jn}, b_{jn}); \\ (b_{jn} - a_{jn})(f(a_{jn}) + f(x_j) + f(b_{jn}))/3, & x_j \in (a_{jn}, b_{jn}). \end{cases}$$

对于边界情况: 当  $x_j \leq a_{j1}$  时,

$$K'_{j1} = 1, K'_{jn} = 0, n \neq 1.$$

当  $x_j \geq b_{j5}$  时,

$$K'_{j5} = 1, K'_{jn} = 0, n \neq 5.$$

经标准化处理后的关联度则为

$$K_{jn} = \frac{K'_{jn}}{\sum_{n=1}^5 K'_{jn}}, n = 1, 2, \dots, 5.$$

根据国内外已有研究成果及工程、试验经验, 取均方差为

$$\sigma = (b_{j4} - a_{j2})/m.$$

式中:  $K_{jn}$  为  $j$  元素的评价指标对  $n$  等级的关联度;  $x_j$  为第  $j$  个元素评价指标的实测值或评价值;  $b_{jn}$ ,  $a_{jn}$  为  $j$  元素  $n$  评价等级区间上下限;  $n$  表示评价等级, 共分为 1 ~ 5 级;  $m$  为方差计算系数, 暂取 12.

## 2.3 子指标层、指标层、分项层评价

由于子指标层和指标层同层部分元素之间不一定完全相对独立, 并且损伤程度大的元素的状态一般更大程度地表征了其上级元素的缺损状态<sup>[10]</sup>. 故评价时宜考虑子指标层、指标层中各个元素的损伤程度对上层元素评价的不同表征程度加以权重修正. 评价等级低 (例如 5 级) 关联度大即损伤较严重的元素修正系数大, 评价等级高 (例如 1 级) 关联度大即损伤程度较小的元素修正系数小. 此时, 元素状态与各等级的关联度为

$$K_{jn} = \frac{\sum_{j'=1}^l (W'_{j'} K'_{j'n})}{\sum_{j'=1}^l W'_{j'}},$$

其中的修正权重  $W'_{j'}$  为

$$W'_{j'} = \frac{\eta_{j'} W_{j'} (W_j - \sum_{j'=1}^k W'_{j'})}{(W_j - \sum_{j'=1}^k W_{j'})}. \quad (1)$$

权重修正时, 按各元素修正系数  $\eta_{j'}$  从大到小的顺序修正,  $\eta_{j'}$  按下式计算:

$$\eta_{j'} = 1 + \sum_{n=1}^5 2(n-1) K_{j'n} / 5.$$

当某元素按式(1)修正后的权重  $W'_{j'} \geq W_j - \sum_{j'=1}^k W'_{j'}$  时, 说明下层元素权重之和已超过其上层元素的权重, 则该元素及剩余元素权重修正重新按下式计算:

$$W'_{j'} = W_{j'} (W_j - \sum_{j'=1}^k W'_{j'}) / (W_j - \sum_{j'=1}^k W_{j'}).$$

式中:  $k$  为已经过权重修正元素个数;  $W_{j'}$  为已经过权重修正元素的初始权重;  $W'_{j'}$  为已经过权重修正元素的修正权重.

## 2.4 项目层评价

对于钢管混凝土结构, 评价模型中分项层的各元素间已相对独立, 故对分项层和项目层元素的关联度采用对下层元素关联度直接加权平均的方法计算, 不再考虑权重修正. 同时, 与现行养护规范的评定方法统一, 分项层和项目层的评价结果用关联度及构件评定标度  $R_j$  表示. 项目层的关联度  $K_{jn}$  和评定标度  $R_j$  按下式计算:

$$K_{jn} = \frac{\sum_{j'=1}^l W_{j'} K_{j'n}}{\sum_{j'=1}^l W_{j'}}$$

$$R_j = \sum_{n=1}^5 5(n-1) K_{jn} / 4.$$

与现行桥梁养护规范评价等级统一, 将评定标度划分为 5 类, 其技术状况、分类及对策见表 3.

表3 各评定标度涵义及分类

| 评定标度 $R_j$ | 技术状况 | 分类 | 对策         |
|------------|------|----|------------|
| 0          | 完好   | 一类 | 正常养护       |
| $\leq 1$   | 良好   |    |            |
| $\leq 2$   | 较好   | 二类 | 小修         |
| $\leq 3$   | 较差   | 三类 | 中修,酌情交通管制  |
| $\leq 4$   | 差的   | 四类 | 大修或改造并交通管制 |
| $\leq 5$   | 危险   | 五类 | 关闭交通并加固或重建 |

### 3 桥梁算例

某主桥净跨为 30 m + 120 m + 30 m 中承式钢管混凝土系杆拱桥. 具体评价过程如下:

1) 由评价专家参考现行桥梁养护规范中推荐的桥梁各构件权重取值, 根据本桥梁的具体情况进行修正, 得到该桥梁各评价元素的初始权重值.

2) 根据计算分析, 确定图 1 模型中没有下级元素的各个元素的评价值及其状态与评价等级 1~5 的关联度.

3) 通过变权计算或直接加权计算, 由低至高逐层计算更高层元素其状态与评价等级 1~5 的关联度, 并计算出分项层和项目层元素评定标度.

限于篇幅, 仅给出分项层部分元素和项目层元素关联度和评定标度计算结果.

经分析计算, 主拱圈其状态与评价等级 1~5 的关联度为

$$(0.801, 0.152, 0.047, 0, 0)$$

主拱圈的评定标度  $R_j$  为 0.31, 相应的状态分类为一类.

吊杆状态与评价等级 1~5 的关联度为

$$(0, 0.021, 0.158, 0.533, 0.288)$$

吊杆的评定标度  $R_j$  为 3.86, 相应的状态分类为 4 类.

最后, 计算得整个桥梁上部结构状态与评价等级 1~5 的关联度为

$$(0.396, 0.189, 0.097, 0.213, 0.105)$$

整个桥梁上部结构的评定标度  $R_j$  为 1.80, 相应的状态分类为二类.

由评价结果可知该桥梁整体上可按正常养护或小修, 但对于吊杆等局部评定标度  $R_j > 3$  的构件, 仍需进行更换或大修.

### 4 结 论

1) 建立了缺损钢管混凝土拱桥上部结构四层次评价模型, 提出模型中各评价指标及其分级标准. 并考虑桥梁各因素的不定性, 构造了正态关联函数进行关联度计算分析, 为钢管混凝土拱桥

上部结构的定量评价提供基础.

2) 对子指标层及指标层部分元素进行评价时, 考虑各元素的缺损状态进行权重修正, 损伤较严重的元素修正系数大, 反之亦然. 对于各构件相对独立的项目层采用直接加权计算的方法进行评价. 这样分类别的评价方法可使评价结果更加符合实际桥梁情况.

3) 子指标层及指标层元素用关联度进行评价; 对分项层和项目层元素则采用关联度及评定标度共同表征元素的缺损状态. 从而与现行《公路桥涵养护规范》(JTG H11-2004) 相统一.

### 参考文献:

- [1] BRENT M P, GLENN A W, DENNIS D R, *et al.* Routine highway bridge inspection condition documentation accuracy and reliability[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2004, 9(4): 403-413.
- [2] XIA Pinqi, BROWNJOHON J M W. Bridge structural condition assessment using systematically validate finite-element model[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2004, 9(5): 418-423.
- [3] 张新占. 桥梁管理系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2000.
- [4] 王有志, 王广洋, 任锋, 等. 桥梁的可靠性评价与加固[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 53-113.
- [5] 中华人民共和国交通部. JTG H11-2004 公路桥涵养护规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 1-47.
- [6] WANG Xuan, WANG M L, ZHAO Yang. Bridge health assessment system with fatigue analysis algorithm[C]//Proc of SPIE: Smart Structures and Materials. Bellingham, WA, USA: Masayoshi Tomizuka, 2005: 901-911.
- [7] FERHAT A, DAN M F. Bridge rating and reliability correlation: comprehensive study for different bridge types[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(7): 1063-1074.
- [8] MICHAEL P E, DAN M F. Reliability based lifetime maintenance of aging highway bridges[C]//Proc of SPIE: in Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities and Pipelines. Bellingham, WA, USA: [s. n.], 2000: 4-13.
- [9] BAIDURYA B, DEGANG L, MICHAEL C, *et al.* Reliability-based load and resistance factor rating using in-service data[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2005, 10(5): 530-543.
- [10] 任宝双, 钱稼茹, 聂建国, 等. 在用钢筋混凝土简支梁桥结构综合评估方法[J]. *土木工程学报*, 2002, 35(2): 97-102.

(编辑 赵丽莹)