

# 采用层次分析法的不同标度计算 铁路混凝土梁桥的部件权重

杨帆<sup>1</sup>, 苏木标<sup>2</sup>, 李青宁<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 石家庄铁道大学大型结构健康诊断与控制研究所, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**为了更准确地确定铁路混凝土梁桥各分层结构(评估要素)及各种震害破坏形式的权重,为铁路混凝土梁桥的地震灾害损失评估提供依据,在分析铁路混凝土梁桥的构造特点及其震害破坏形式的基础上,采用层次分析法中的不同标度构建判断矩阵,计算铁路混凝土梁桥部件的权重,并对计算结果分析比较.研究表明, $2^{0/2} \sim 2^{8/2}$ 指数标度的一致性最好,即采用该标度计算铁路梁桥各分层结构(评估要素)及各种震害破坏形式的权重最合适.

**关键词:**层次分析法;不同标度;铁路混凝土梁桥;权重

**中图分类号:**TU12

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7930(2013)02-0222-06

近年来,地震灾害频发,对铁路交通造成不同程度的破坏,轻者影响正常的交通运输,严重者可能造成交通瘫痪.对这些被损坏桥梁的地震灾害损失进行快速评估是组织抢险救灾和制定重建规划的重要依据,也是研究地震灾害的基础资料,对未来防震减灾具有深远意义.

权重的计算是铁路桥梁地震灾害评估中的一项重要工作,而运用层次分析法计算权重则简单快捷.

层次分析法是美国运筹学家匹兹堡大学的 T. L. Saaty<sup>[1]</sup>教授于 20 世纪 70 年代首次提出,该方法定量分析和定性分析相结合的系统分析方法.层次分析法通过明确问题,建立层次分析结构模型,构造判断矩阵,层次单排序和层次总排序五个步骤计算各层次构成要素对总目标的组合权重.该方法能够有效分析目标准则体系层次间的非序列关系,有效地综合测度决策者的判断和比较,由于系统简洁、实用,在社会、经济、管理等许多方面得到了越来越广泛的应用.

自 20 世纪 80 年代初引入我国以来,国内学者对其做了很多改进和完善工作.其中,标度问题是研究方向之一.左军<sup>[2]</sup>针对 Saaty 的 1~9 标度法构造矩阵比较困难,提出了 0~2 三标度法;徐泽水<sup>[3]</sup>在 0~2 标度法的基础上又提出了一 1~1 三标度法和一 2~2 五标度法;随后,舒康<sup>[4]</sup>等提出了指数标度法;汪浩<sup>[5]</sup>等提出了 9/9~9/1 分数标度法和 10/10~18/2 分数标度法;侯岳衡<sup>[6]</sup>在舒康等的指数标度法基础上提出了  $9^{0/9} \sim 9^{8/9}$  指数标度法.

本文根据模糊层次分析法原理,采用不同标度计算了铁路混凝土梁桥各分层结构(评估要素)及各种震害破坏形式的权重,并对计算结果进行分析比较.

## 1 模糊层次分析法原理

### 1.1 建立层次分析模型

在理清有待分析的问题的基础上,将复杂问题分解为若干组成元素,并将不同组成元素按类进行分组,然后建立多层次评价模型(见图 1).

### 1.2 构建模糊判断矩阵

设系统有待进行重要性比较的指标集  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i \dots a_n\}$ ,  $a_i$  为第  $i$  个有待进行比较的指标,

收稿日期:2012-05-22 修改稿日期:2013-03-20

基金项目:中国地震局地震行业科研专项经费资助项目(201008005)

作者简介:杨帆(1984-),女,河北张家口人,博士研究生,主要从事桥梁抗震方面的研究。

$i = 1, 2, \dots, n$ , 其中  $n$  为有待比较的指标总数. 将指标集  $A$  中的指标就其“重要性”进行二元对比分析, 定性排序.

以 1~9 标度为例, 指标集中的指标  $a_k$  与  $a_l$  作二元对比, 若:  $a_k$  比  $a_l$  极端重要, 令排序标度  $r_{kl} = 9$ ,  $r_{lk} = 1/9$ ;  $a_k$  与  $a_l$  同等重要, 令  $r_{kl} = 1$ ,  $r_{lk} = 1$ ;  $a_l$  比  $a_k$  极端重要, 令  $r_{kl} = 1/9$ ,  $r_{lk} = 9$ .  $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $l = 1, 2, \dots, n$ . 对于两指标重要性程度的描述, 1 与 9 对应着两个描述重要性程度的形容词: 同样重要与极端重要. 标度不同,  $r_{kl}$  取值不同, 表 1 给出了 6 种不同标度的取值.

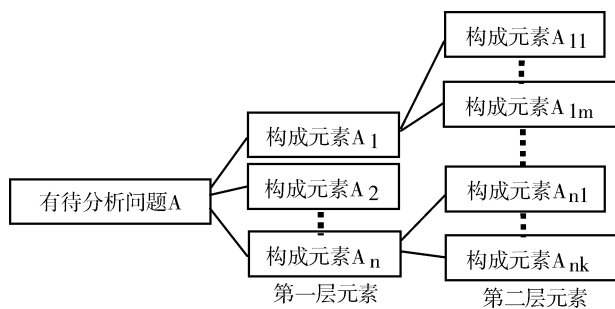


图 1 多层次评价模型分层图

Fig. 1 Hierarchical map of multi-level evaluation model

表 1 语气算子与模糊标度对照表

Tab. 1 Contrast of hedge operator against fuzzy scale

模糊标度	同样	微小	稍微	更为	明显	十分	强烈	更强烈	极端
1~9 标度	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9/9~9/1 标度	9/9 (1.000)	9/8 (1.125)	9/7 (1.286)	9/6 (1.500)	9/5 (1.800)	9/4 (2.250)	9/3 (3.000)	9/2 (4.500)	9/1 (9.000)
10/10~18/2 标度	10/10 (1.000)	11/9 (1.222)	12/8 (1.500)	13/7 (1.857)	14/6 (2.333)	15/5 (3.000)	16/4 (4.000)	17/3 (5.667)	18/2 (9.000)
$9^{0/9} \sim 9^{8/9}$ 标度	$9^{0/9}$ (1.000)	$9^{1/9}$ (1.277)	$9^{2/9}$ (1.629)	$9^{3/9}$ (2.080)	$9^{4/9}$ (2.655)	$9^{5/9}$ (3.389)	$9^{6/9}$ (4.327)	$9^{7/9}$ (5.523)	$9^{8/9}$ (7.225)
$2^{0/2} \sim 2^{8/2}$ 标度	$2^{0/2}$ (1.000)	$2^{1/2}$ (1.414)	$2^{2/2}$ (2.000)	$2^{3/2}$ (2.828)	$2^{4/2}$ (4.000)	$2^{5/2}$ (5.657)	$2^{6/2}$ (8.000)	$2^{7/2}$ (11.314)	$2^{8/2}$ (16.000)
$e^{0/4} \sim e^{8/4}$ 标度	$e^{0/4}$ (1.000)	$e^{1/4}$ (1.284)	$e^{2/4}$ (1.649)	$e^{3/4}$ (2.117)	$e^{4/4}$ (2.718)	$e^{5/4}$ (3.490)	$e^{6/4}$ (4.482)	$e^{7/4}$ (5.755)	$e^{8/4}$ (7.390)

在比较中还可以在相邻两级语气算子中再插入模糊标度, 进行两两比较, 以确定它们的重要性.

设表示元素  $a_1, a_2, \dots, a_n$  两两比较重要程度的模糊判断矩阵  $R$  为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{且满足条件: } \begin{cases} r_{ij} = 1, i = j \\ r_{ij} = 1/r_{ji} \end{cases} \quad (1)$$

元素  $a_1, a_2, \dots, a_n$  的权重分别为  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ,  $r_{ij}$  表示元素  $a_i$  比元素  $a_j$  重要的隶属度,  $r_{ij}$  越大说明元素  $a_i$  比元素  $a_j$  越重要,  $r_{ij} = 1$  表示元素  $a_i$  与元素  $a_j$  同等重要. 另一方面, 由权重的定义知,  $\omega_i$  是对元素的重要程度的一种度量,  $\omega_i$  越大,  $a_i$  就越重要.

### 1.3 由模糊判断矩阵求权重 $\omega_i$ 值

利用 MATLAB 程序计算模糊判断矩阵  $R$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$  对应的特征向量  $\bar{\omega}$ , 特征向量经归一化后的各个元素即为对应评定指标的权重系数<sup>[6]</sup>.

## 2 铁路混凝土梁桥权重分析

### 2.1 分层结构模型

震害统计资料表明, 任何建筑物的地震破坏都与它的结构构造特点密切相关. 铁路混凝土梁桥的组成, 大体可分为桥面系、上部结构和下部结构三大部分, 其中桥面系包括轨道结构及人行道, 上部结构包括主梁和横隔板, 下部结构分为桥台和桥墩, 桥台和桥墩有其不同的构造. 根据铁路混凝土梁桥的结构特点和层次分析法原理, 可绘出铁路混凝土梁桥的分层结构及其破坏形式对应关系示意图, 如图 2 所示.

## 2.2 构建铁路混凝土梁桥的部件判断矩阵

依据模糊层次分析法结合铁路混凝土梁桥的分层结构图(图2),以及铁路混凝土梁桥的结构特点和受力特征以及损坏后修复的难易程度,可以构建铁路混凝土梁桥下部结构、上部结构、桥面系判断矩阵。

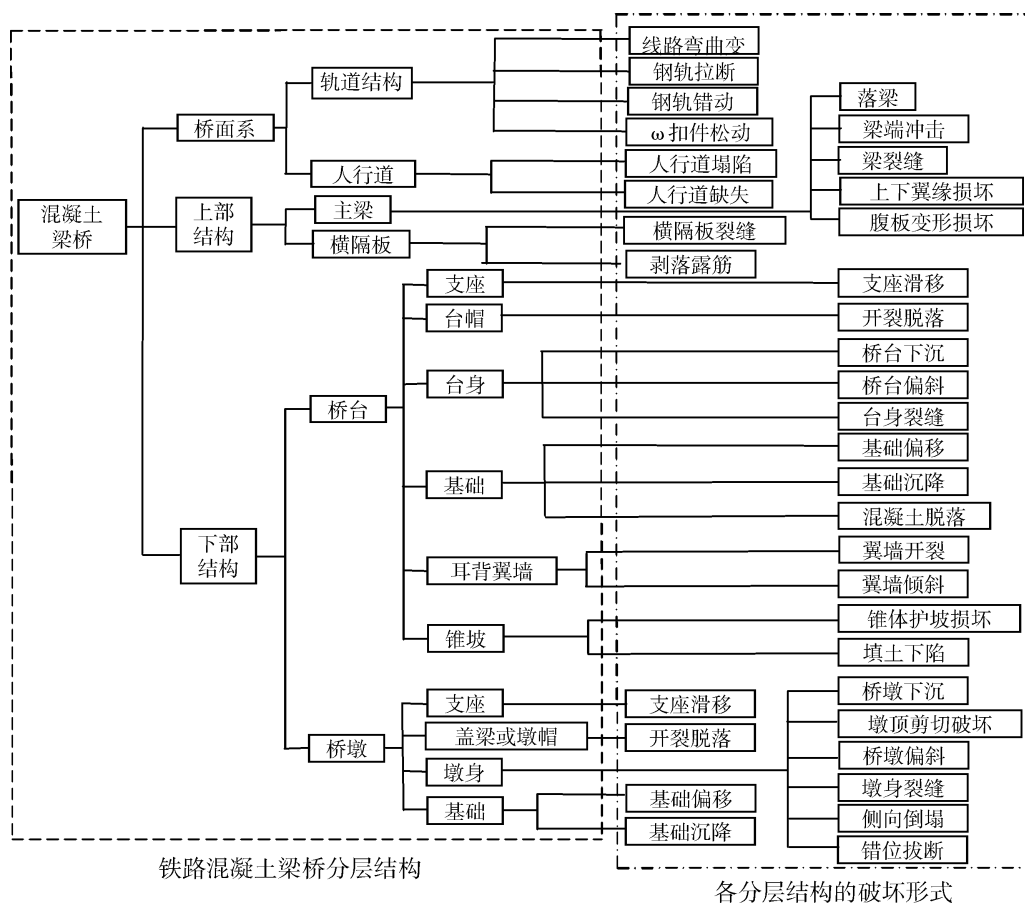


图2 铁路混凝土梁桥分层结构及其震害破坏形式对应关系

Fig.2 Corresponding relation of hierarchical structure and earthquake damage mode of railway concrete girder bridge

设下部结构、上部结构和桥面系分别为因素1、2和3。以1~9标度为例,下部结构与上部结构相比,根据桥梁破坏的结构特点结合经验,选择语气算子为“微小”故 $r_{12} = 2$ ;下部结构与桥面系相比,选择语气算子为“强烈”,则 $r_{13} = 7$ ;而上部结构与桥面系相比,选择语气算子为“十分”,则 $r_{23} = 6$ ;根据公式(1),可知 $r_{11} = 1$ , $r_{22} = 1$ , $r_{33} = 1$ , $r_{21} = 1/2$ , $r_{31} = 1/7$ , $r_{32} = 1/6$ ;建立铁路混凝土梁桥下部结构、上部结构和桥面系的模糊判断矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 7 \\ 1/2 & 1 & 6 \\ 1/7 & 1/6 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

标度不同得到的 $R$ 矩阵不同,表2列出了6种不同标度下铁路混凝土梁桥下部结构、上部结构和桥面系的模糊判断矩阵。

## 2.3 由模糊判断矩阵求权重 $\omega_i$ 值

利用MATLAB程序求式(2)的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量为 $\bar{\omega}_1 = 0.8536$ , $\bar{\omega}_2 = 0.5108$ , $\bar{\omega}_3 = 0.1019$ ,归一化后,即得到对应评定指标的权重系数 $\omega_1 = 0.58$ , $\omega_2 = 0.35$ , $\omega_3 = 0.07$ 。同理,得到不同标度下的铁路桥梁下部结构、上部结构和桥面系的权重见表3。

表 2 各种标度下铁路混凝土梁桥的判断矩阵

Tab. 2 Judgment matrix of railway concrete girder bridges in several scales

矩阵 $R$	1~9 标度	9/9~9/1	10/10~18/2	$9^{0/9} \sim 9^{8/9}$	$2^{0/2} \sim 2^{8/2}$	$e^{0/4} \sim e^{8/4}$
$r_{11}$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
$r_{12}$	2.000	1.125	1.222	1.277	1.414	1.284
$r_{13}$	7.000	3.000	4.000	4.327	8.000	4.482
$r_{21}$	1/2.000	1/1.125	1/1.222	1/1.277	1/1.414	1/1.284
$r_{22}$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
$r_{23}$	6.000	2.250	3.000	3.389	5.657	3.490
$r_{31}$	1/7.000	1/3.000	1/4.000	1/4.327	1/8.000	1/4.482
$r_{32}$	1/6.000	1/2.250	1/3.000	1/3.389	1/5.657	1/3.490
$r_{33}$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

表 3 铁路混凝土梁桥下部结构上部结构和桥面系的权重

Tab. 3 The weight of substructure, superstructure and bridge decking of railway concrete girder bridges

部件	权重	1~9 标度	9/9~9/1	10/10~18/2	$9^{0/9} \sim 9^{8/9}$	$2^{0/2} \sim 2^{8/2}$	$e^{0/4} \sim e^{8/4}$
下部结构	$\omega_1$	0.58	0.46	0.49	0.50	0.54	0.50
上部结构	$\omega_2$	0.35	0.38	0.39	0.42	0.38	0.39
桥面系	$\omega_3$	0.07	0.16	0.12	0.08	0.08	0.11

2.4 不同标度判断矩阵的比较

一致性是用于描述矩阵自身特性的概念. 矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$ , 如果对任意的  $k(k = 1, 2, \dots, n)$ , 等式  $r_{ij} = r_{ik} \times r_{kj}$  都成立, 则称矩阵  $R$  为一致矩阵<sup>[8]</sup>.

层次分析法中引入一致性的概念, 主要是用于评判决策者构造出来的判断矩阵是否可以接受, 很显然, 如果构造出来的判断矩阵是一致的, 则表明, 虽然决策者只进行了两两比较, 但其做出的定性判断在逻辑上符合传递性要求. 于是, 层次分析法中引入了一致性指标  $C.R.$  (Consistent Matrix R) 作为衡量判断矩阵一致性的标准, 并规定  $C.R.$  只要在一定范围内, 就认为可以接受. 显然,  $C.R.$  越小, 判断矩阵的一致性越好, 当  $C.R. = 0$  时, 判断矩阵完全一致.

一致性指标  $C.R.$  <sup>[9]</sup> 计算方法如下:

设: 
$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \text{ 则 } C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \tag{3}$$

其中:  $C.I.$  (Consistent Indicator) 表示一致性指标,  $R.I.$  (Matrix R Indicator) 是给定的统计意义上的常数.

下面对这 6 种不同标度构造出来的判断矩阵(式(2))进行一致性比较, 由于不同标度下的判断的阶数都相同( $n=3$ ), 因此, 只需要比较  $C.I.$  (见表 4), 就知道哪个标度更好. ( $C.I.$  绝对值越小越好)

表 4 不同标度下所得的最大特征根  $\lambda_{\max}$  及  $C.I.$

Tab. 4  $\lambda_{\max}$  and  $C.I.$  in several scales

$\lambda_{\max}$ 及 $C.I.$	1~9 标度	9/9~9/1 标度	10/10~18/2 标度	$9^{0/9} \sim 9^{8/9}$ 标度	$2^{0/2} \sim 2^{8/2}$ 标度	$e^{0/4} \sim e^{8/4}$ 标度
$\lambda_{\max}$	3.032 366 617	3.003 208 155	3.000 844 799	3.000 000 003	3.000 000 002	3.000 000 004
$C.I.$	0.016 183 308	0.001 604 077	0.000 422 399	0.000 000 001 5	0.000 000 001	0.000 000 002

由表 4 可知, 指数标度的一致性更好, 其中  $2^{0/2} \sim 2^{8/2}$  标度的一致性最好, 同理计算混凝土梁桥桥墩在不同标度下的权重, 也可以得到同样的结论.

2.5 铁路混凝土梁桥各分层结构及各种破坏形式的权重计算

根据层次分析法原理, 采用  $2^{0/2} \sim 2^{8/2}$  标度构造模糊判断矩阵, 可计算出铁路混凝土梁桥各分层结

构(评估要素)及各种破坏形式的权重,见表 5、6、7、8.

表 5 铁路混凝土梁桥各评估要素的权重

Tab. 5 Weights of each evaluation factor of railway concrete girder bridge

结构	桥面系		上部结构		下部结构									
					桥台					桥墩				
评估要素	轨道结构	人行道	主梁	横隔板	支座	台帽	台身	基础	耳背翼墙	锥坡	支座	盖梁	墩身	基础
权重	0.85	0.15	0.63	0.37	0.09	0.12	0.27	0.28	0.12	0.12	0.13	0.18	0.32	0.37

表 6 铁路混凝土梁桥桥台各种破坏形式的权重

Tab. 6 Weights of different earthquake damage forms of railway concrete girder bridge abutment

评估要素	支座	台帽	台身			基础			耳背翼墙		锥坡	
震害破坏形式	支座 滑移	开裂 脱落	桥台 下沉	桥台 偏斜	台身 裂缝	基础 偏移	基础 沉降	混凝土 脱落	翼墙 开裂	翼墙 倾斜	锥体护 坡损坏	填土 下陷
权重	1.00	1.00	0.46	0.38	0.16	0.40	0.45	0.15	0.40	0.60	0.50	0.50

表 7 铁路混凝土梁桥桥墩各种破坏形式的权重

Tab. 7 Weights of different earthquake damage forms of railway concrete girder bridge pier

评估要素	支座	盖梁	墩身						基础		
震害破坏形式	支座 滑移	开裂 脱落	桥墩 下沉	墩顶 剪切破坏	桥墩 偏斜	墩身 裂缝	侧向 倒塌	错位 拔断	基础 偏移	基础 沉降	
权重	1.00	1.00	0.24	0.36	0.22	0.18	*	*	0.50	0.50	

注: \* ——表示一旦出现此种破坏形式,此墩及与此墩相关的桥跨已完全破坏,不参与权重计算.

表 8 铁路混凝土梁桥桥面系和上部结构各种破坏形式的权重

Tab. 8 Weights of different earthquake damage forms of bridge deck system and superstructure of railway concrete girder bridge

结构	桥面系						上部结构							
评估要素	轨道结构			人行道			主梁					横隔板		
震害破坏形式	线路 弯曲	钢轨 拉断	钢轨 错动	扣件 松动	人行道 塌陷	人行道 缺失	落梁	梁端 冲击	梁裂缝	上下翼 缘损坏	腹板变 形损坏	横隔板 裂缝	剥落 露筋	
权重	0.31	0.28	0.26	0.15	0.80	0.20	*	0.35	0.17	0.26	0.22	0.50	0.50	

注: \* ——表示一旦出现此种破坏形式,此孔梁已完全破坏,不参与权重计算.

### 3 结 语

本文在分析了铁路混凝土梁桥结构特点的基础上,根据层次分析法原理,采用 6 种不同标度计算铁路混凝土梁桥三大部件的权重,并对这 6 种不同标度的分析效果进行了比较.结果表明: $2^{0/2} \sim 2^{8/2}$  指数标度的一致性最好,即采用该标度计算铁路混凝土梁桥各分层结构的权重最合适.文中采用该标度计算了铁路混凝土梁桥各分层结构(评估要素)及各种破坏形式的权重,此方法也可以用来计算铁路其他类型桥梁的权重,为铁路桥梁的震害损失评估和安全状态评估提供重要的依据.

### 参考文献 References

- [1] SAATY T L. Modeling unstructured decision problems-the theory of analytical hierarchies[J]. Math. Comput. Simulation, 1978, 20(1): 147-158.
- [2] 左 军. 层次分析法中判断矩阵的间接给出法[J]. 系统工程, 1988, 10(6): 56-63.  
ZUO Jun. Indirect method for constructing judgment matrix in AHP[J]. Chinese Journal of Systems Engineering, 1988, 10(6): 56-63.
- [3] 徐泽水. 层次分析新标度法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(10): 74-77.

- XU Ze-shui. A new scale method in AHP[J]. Chinese Journal of Systems Engineering-Theory and Practice, 1998, 18(10):74-77.
- [4] 舒康, 梁镇伟. AHP中的指数标度[J]. 系统工程理论与实践, 1990, 10(1):6-8.  
SHU Kang. LIANG Zhen-wei. Index number scale in AHP[J]. Chinese Journal of Systems Engineering-Theory and Practice, 1990, 10(1):6-8.
- [5] 汪浩, 马达. 层次分析法标度评价与新标度方法[J]. 系统工程理论与实践, 1993, 13(5):24-26.  
WANG Hao. MA Da. Scale evaluation and new scale methods[J]. Chinese Journal of Systems Engineering-Theory and Practice, 1993, 13(5):24-26.
- [6] 侯岳衡, 沈德家. 指数标度及其与几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践, 1995, 15(10):43-46.  
HOU Yue-heng. SHEN De-jia. Index number scale and comparison with other scales[J]. Chinese Journal of Systems Engineering-Theory and Practice, 1995, 15(10):43-46.
- [7] 杨帆. 铁路桥梁地震灾害损失评估技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2010:68-91.  
YANG Fan. Study on the assessment technology of the earthquake loss of railway bridge[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2010:68-91.
- [8] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2):80-88.  
ZHANG Ji-jun. Fuzzy analytical hierarchy process[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(2):80-88.
- [9] 骆正清, 杨善林. 层次分析法中几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 9(10):51-60.  
LUO Zheng-qing. YANG Shan-lin. Comparative Study on Several Scales in AHP[J]. Chinese Journal of Systems Engineering-Theory and Practice, 2004, 9(10):51-60.

## Calculation on weights of railway concrete girder bridges parts by several scales in the analytic hierarchy process

YANG Fan<sup>1</sup>, SU Mu-biao<sup>2</sup>, LI Qing-ning<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

2. Structural Health Monitoring and Control Institute, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In order to accurately determine the weights of hierarchical structure and earthquake damage mode of railway concrete girder bridges and provide a basis for the earthquake disaster damage assessment of railway bridges, this paper was based on analysing the construction features of the railway concrete girder bridges and destructive characteristic of seismic damage and proposed a method, which was to layer various kinds railway concrete girder bridges. It adopted several scales in the analytic hierarchy process, where the judgment matrix was built, the weights of railway concrete girder bridges parts were calculated, compared and analysed. It is found that consistency of  $2^{0/2} \sim 2^{8/2}$  index scale is best, namely this index scale is most suitable to calculate the weights of hierarchical structure and earthquake damage mode of railway concrete girder bridges.

**Key words:** analytic hierarchy process; several scales; railway concrete girder bridge; weight