

# Application of Analytic Hierarchy Process to Assessment of Flood Resistance of Mountain Highway Bridges

Wenyong Yan<sup>1</sup>, Tang Tang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>Sichuan Huateng Highway Engineering Test Checking Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Email: \*447248080@qq.com

Received: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2018; accepted: Nov. 13<sup>th</sup>, 2018; published: Nov. 20<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

By analyzing the main indexes affecting the flood resistance capability of highway bridges in mountainous areas, the flood resistance evaluation model is cut. Using the expert field survey score, the minimum level evaluation standard of the working state of the flood resistance index is formed, and the Delphi expert scoring method and the analytic hierarchy process (AHP) method are used to obtain the weight of the influence of the sub indexes on the upper level index, and finally the grade of the flood resistance function index of the mountain road and bridge is obtained. Through engineering examples, the applicability and reliability of the basic model of comprehensive evaluation are verified, which has a good guiding significance for the evaluation of flood resistance capability of highway bridges in mountainous areas.

## Keywords

Bridge, Flood Resistance Capability, Evaluation, AHP, Weight

---

# 基于层次分析法在山区公路桥梁 抗洪能力评估中的应用

颜文勇<sup>1</sup>, 唐 堂<sup>2</sup>

<sup>1</sup>成都工业学院, 四川 成都

<sup>2</sup>四川华腾公路试验检测有限责任公司, 四川 成都

Email: \*447248080@qq.com

收稿日期: 2018年10月22日; 录用日期: 2018年11月13日; 发布日期: 2018年11月20日

\*通讯作者。

## 摘要

通过分析影响山区公路桥梁抗洪能力的主要指标建立了抗洪评估模型。采用专家现场勘测评分, 构成抗洪指标的工作状态最低层评价标准, 并运用德尔菲专家评分法和层次分析法取得各项分项指标对上一层指标影响的权重, 最终获取山区公路桥梁抗洪功能性指标等级。通过工程实例, 验证了综合评估基本模型的适用性和可靠性, 对山区公路桥梁抗洪能力评价具有较好的指导意义。

## 关键词

桥梁, 抗洪能力, 评估, 层次分析法, 权重

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

受“5.12”汶川地震、“4.23”芦山地震影响, 导致四川省震区土质松软, 加之气候反常致使山区河流洪水发生频率增加, 山区洪涝严重。洪水期间多发生特大洪水和泥石流, 冲刷桥梁, 同时由于河道采砂严重, 河床环境不稳定, 桥梁冲刷变得严重。很多既有桥梁受洪水的冲刷, 导致部分桥梁发生变形, 甚至垮塌。由于洪水冲刷发生垮塌的桥梁有: 绵阳市江油盘江大桥(图 1)、成都市彭州市川西大桥(图 2)、美国密西西比州公路 33 桥梁(图 3)和台湾地区台中县后丰大桥(图 4)。因此, 对桥梁进行抗洪能力评估具有重要的理论和实际意义。

在桥梁抗洪能力评估方面, 美国将桥梁冲刷、车船撞击桥梁和超载认为是桥梁垮塌的三大原因。据估计, 所有桥梁倒塌中约 60%来自墩台基础冲刷等相关原因导致的[1]。美国联邦公路局 FHWA 制订了桥梁抗洪能力的检测依据[2], 该规范规定了对桥梁所在河道及桥墩桥台基础冲刷状况检测。同时“FHWA T5140.23 Evaluating Scour at Bridge”[3]提供桥梁冲刷评估指导。中国公路桥梁抗洪能力评估目前主要依据《公路桥涵养护规范》(JTG H11-2004) [4]进行评估。该规范在实际运用中操作相对简单, 但具有缺乏定量分析, 多依据工程经验判定, 受评估人员主观影响大等不足之处, 有待于在生产实践中进一步完善。



Figure 1. The collapse of the Jiangyou Panjiang Bridge in Mianyang City, China

图 1. 中国绵阳市江油盘江大桥冲毁照



**Figure 2.** The ruined photo of the Chuanxi Bridge in Pengzhou, Chengdu, China  
**图 2.** 中国成都市彭州市川西大桥冲毁照



**Figure 3.** The 33 bridges in the Mississippi, USA  
**图 3.** 美国密西西比州公路 33 桥梁冲毁照



**Figure 4.** The ruined photo of the Houfeng Bridge in Taichung County, Taiwan  
**图 4.** 台湾地区台中县后丰大桥冲毁照

当前国内学者采用不同研究方法对桥梁抗洪能力进行了研究。李整等[5]将模糊数学理论应用于进行桥梁抗洪能力的评估中。张贵宗[6]在桥梁适应性评定的关键技术研究中，对桥梁抗洪能力进行了研究，总结了一套完整的桥梁抗洪评定体系。彭子祥针对洪水环境下群桩基础桥梁易损性进行了深入的分析与评估[7]。但目前将层次分析法应用于桥梁抗洪评定的文献十分缺少，本文综合考虑了各影响指标的现实状况，结合实际调查结果，对各指标进行相应地权重分析，建立隶属函数，通过层次分析法，建立山区公路桥梁抗洪综合性评估模型。

## 2. 基于层次分析法的抗洪能力评估模型

### 2.1. 建模思路

目前桥梁综合评估常用层次分析法(AHP), 模糊综合评估等方法。层次分析法采取相对权重概念, 把权重的判断进行定量化。这样比专家直接打分、直接赋权等经验方法更客观、科学。AHP 比较适合复杂层次结构的多指标决策, 它在处理定性、定量因素中, 具有简洁性、实用性、系统性等优点。因此, 本文采用层次分析法, 进而将影响桥梁抗洪能力各种因素条理化、层次化, 把对某个状态影响程度相近或比较紧密的因素放在一起, 形成一个层, 从而建立多层次的指标体系, 解决了桥梁抗洪评估影响因素众多, 难以定量分析等问题。同时, 通过判断矩阵的建立方法以及互反矩阵的一致性判断方法, 利用层次分析法, 可以正确地评定其对应的功能性工作状态等级。

### 2.2. 基本模型的建立

#### 2.2.1. 评估层次的建立

建立评估层次应首先将所研究的复杂问题对应的分解成为若干组成部分, 并称其为元素, 再将各元素按不同的共有属性划分成为不同的属性组别, 从而形成不同的层次。而同一层元素受到对应的上层元素的制约, 同时也对对应的下层元素可以起到支配作用。这种逐层支配关系即形成了所谓的递阶层次结构。处于最上面的层次往往只有一个元素, 则该元素一般是分析的最终目标。因此, 能否合理划分层次结构将直接影响最终的评判结果的正确性与有效性。

#### 2.2.2. 判断矩阵的构造

建立评估层次后, 上下层元素间的相互关系就可以被确定下来。以上一层次元素  $B$  作为准则。其对下一层次  $A_1, A_2, \dots, A_n$  起到相应的支配作用, 层次分析法是采用两两比较的方法来得到准则  $B$ , 下各元素的权重, 即比较的影响程。本文中按照 3 标度法对同一层次各元素关于上一层次中某一准则的重要性进行两两比较, 构造比较矩阵  $B$ 。其中,  $c_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$ ) 表示评价因素  $i$  和因素  $j$  相对于目标的重要性, 并满足  $c_{ii}=1, c_{ij}+c_{ji}=2$ 。

#### 2.2.3. 评估指标权重的确定

在进行多指标综合评价时, 权重会直接影响评价结果的准确性。本文将根据评价指标  $V_1, V_2, \dots, V_n$  对于  $V$  的判断矩阵  $A$ , 求出它们对于指标  $V_1$  的权重  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 。对于  $V_1, V_2, \dots, V_n$  通过两两比较得到判断矩阵  $A$ , 解特征根问题  $A\omega = \lambda_{\max}\omega$ , 得到的  $\omega$  经归一化就可以作为指标  $V_1, V_2, \dots, V_n$  对于指标  $V_1$  的权重向量写成向量形式为  $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 。这种方法为排序向量计算的特征根法。

$\lambda_{\max}$  和  $\omega$  的计算一般采用幂法, 其步骤为:

- 1) 任取初始向量  $X^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})^T$ , 先取  $k=0$ , 计算得到  $m^{(k)} = \max_{i=1}^n \{x_i^{(k)}\}$ ,  $Y^{(k)} = (1/m^{(k)})X^{(k)}$ ;
- 2) 迭代计算  $X^{(k+1)} = AY^{(k)}$ ,  $m^{(k+1)} = \max_{i=1}^n \{x_i^{(k+1)}\}$ ,  $Y^{(k+1)} = (1/m^{(k+1)})X^{(k+1)}$ ;
- 3)  $|m^{(k+1)} - m^{(k)}| < \varepsilon$  或  $|Y^{(k+1)} - Y^{(k)}| < \varepsilon$  时做步骤 4), 否则令  $k = k + 1$ , 转换步骤 2);
- 4) 将  $Y^{(k+1)}$  归一化, 即:

$$\omega = \frac{Y^{(k+1)}}{\sum_{i=1}^n Y_i^{(k+1)}}, \lambda_{\max} = m^{(k+1)} \quad (1)$$

### 2.2.4. 计算 CI, 进行一致性检验

通常, 在确定两两比较判断矩阵元素时, 由于客观事物的复杂性以及人类判断能力的差别, 决定了人们所构造的判断矩阵难以达到完全一致, 即不能保证公式成立。因此, 一致性偏离过大时, 将特征向量作为权重进行判断时, 将会导致判断失误。因此通过计算出判断基桩最大特征根对应的特征向量后, 对判断基桩进行一致性检验。计算一致性比例 C.R.。当 C.R. < 0.10 时, 则认为该判断矩阵的一致性是可以接受的。即将特征向量作为因素原始向量。否则应对其进行调整。根据权重计算结果, 针对中间层计算对应的一致性指标 C.R.。

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (2)$$

## 2.3. 抗洪评估模型的评定

### 2.3.1. 桥梁抗洪评估体系的确定

在役山区公路桥梁的抗洪性能评定是一个非常复杂的问题, 影响桥梁抗洪能力的因素较多, 而且各因素之间相互作用, 关系复杂。因此, 桥梁抗洪能力评估指标体系建立的科学性直接影响评估结果的准确性。本文从桥梁环境影响程度指标及桥梁抗洪能力影响指标两方面出发, 对影响因素进行了深层次的划分, 完成桥梁抗洪能力评估目标及层级架构。具体上讲, 对于山区桥梁抗洪能力评估研究中将影响桥梁抗洪能力的因素划分为两类: 一类是河道造成的冲刷影响因素; 二类是桥梁构造的抗洪影响因素。各项目加分汇总即是桥梁的抗洪能力, 分数越高表示桥梁抗洪能力越差。

桥梁环境影响程度指标和桥梁抗洪能力影响指标分别见图 5 和图 6。利用层次分析法对各个项目指标确定权重, 权重确定后通过与指标项目内容评定分数相乘, 得到各个指标分数。

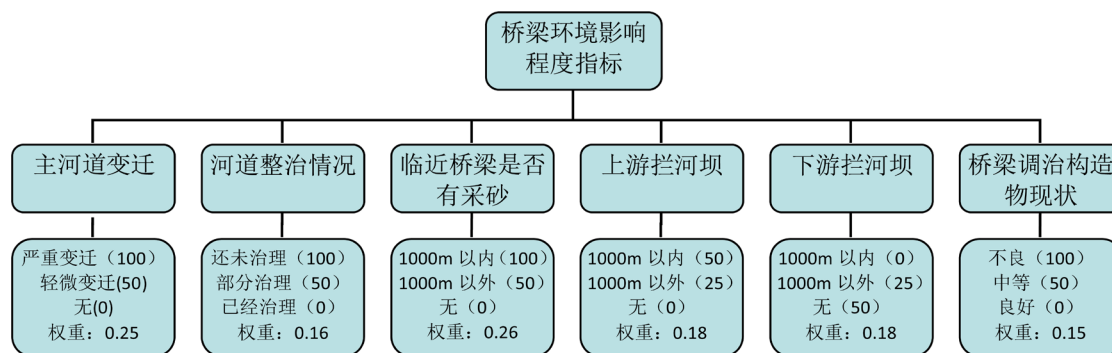


Figure 5. Evaluation index of bridge environmental impact degree

图 5. 桥梁环境影响程度评估指标图

### 2.3.2. 桥梁抗洪状态评估

本文参照《公路桥涵养护规范》(JTG H11-2004), 将桥梁抗洪能力等级划分为 1 类、2 类、3 类、4 类和 5 类等 5 个等级进行评估, 见表 1。

## 3. 工程实例

青莲大桥位于四川省省道 S205 线江油市境内 K266 + 270 处, 跨越湔江, 于 1993 年 6 月建成并投入使用。桥梁全长 216.2 m, 全宽 23.0 m, 净宽 20.0 m。桥梁设计洪水频率 1/100。该桥上部结构: 3 × 61.8 m 的钢筋混凝土箱型拱肋。桥梁下部结构: U 型重力式桥台及扩大基础。桥梁立面照片见图 7 和桥梁桥址情况见图 8 [8]。



该桥抗洪能力评定采用本文提出的层次分析法对抗洪能力进行评定。青莲大桥根据 2013 年河床断面测量资料并绘制河床断面图, 如图 9 所示, 由河床测量资料分析可知该桥墩裸露高度为 7.1 m 最为严重, 故选取 1。桥墩作为本次评估桥墩。根据青莲大桥 2013 年河床断面图同 1993 年该桥竣工的河床断面图比较, 河床变化整体为发生变化, 故主河道变化为轻微变迁; 河床高程及主深槽位置均明显变化, 经现场勘查和实地调查该桥在本世纪初存在采砂情况; 桥梁基础未设置保护措施; 上、下游侧经过现场勘查均未设置拦河堰。将青莲大桥环境影响程度情况进行分析, 得到桥梁环境程度指标分数为 65.5, 计算数

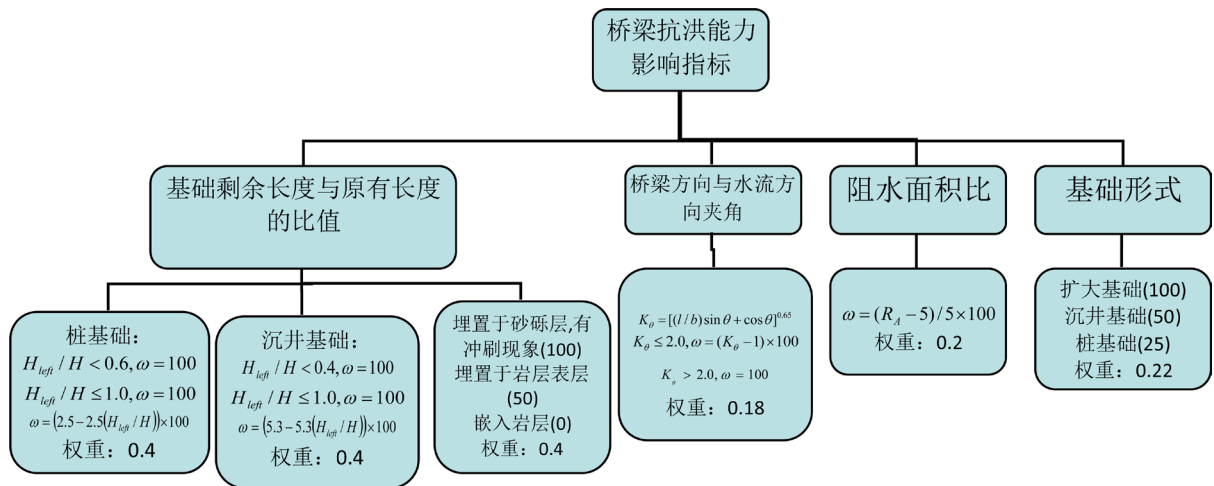


Figure 6. Hazard index chart for evaluating flood resistance capacity of bridges

图 6. 桥梁抗洪能力评估危害指标图

Table 1. Classification of bridge flood resistance rating

表 1. 桥梁抗洪能力评定等级划分

评估等级	涵义及状态	等级划分
1 类	抗洪能力好, 危险性非常低	0~20
2 类	抗洪能力较好, 危险性低	20~40
3 类	抗洪能力一般, 危险性中	40~60
4 类	抗洪能力较差, 危险性高	60~80
5 类	抗洪能力差, 危险性非常高	80~100



Figure 7. Elevation of bridge of Qing Lian Bridge

图 7. 青莲大桥桥梁立面照



**Table 3.** Calculation of hazard index for bridge flood resistance assessment  
**表 3.** 桥梁抗洪能力评估危害指标计算

项目	权重	评估内容		配分	评分
基础剩余长度与原有长度的比值	0.4	桩基础	$H_{left}$ 当 $H_{left}/H < 0.6, \omega = 100$	50	20
			$H$ 当 $H_{left}/H \leq 1.0, \omega = 100, \omega = (2.5 - 2.5(H_{left}/H)) \times 100$		
		沉井基础	$H_{left}$ 当 $H_{left}/H < 0.4, \omega = 100$		
			$H$ 当 $H_{left}/H \leq 1.0, \omega = 100, \omega = (5.3 - 5.3(H_{left}/H)) \times 100$		
桥墩方向与水流方向夹角	0.18	$\theta$	0 $K_{\theta} = [(l/b)\sin\theta + \cos\theta]^{0.65}$ : $l$ 为桥墩横桥向深度, $b$ 为桥墩等值宽度	0	0
			当 $K_{\theta} \leq 2.0, \omega = (K_{\theta} - 1) \times 100$ , 当 $K_{\theta} > 2.0, \omega = 100$		
阻水面积比 $R_s$ (%)	0.20	$R_A$	5.5 $\omega = (R_s - 5)/5 \times 100$ $R_s = \frac{\text{设计洪水水位下结构物断面积}}{\text{设计洪水水位下河床断面积}}$	10	2
基础形式	0.22	■扩大基础(100) □桩基础(0) □沉井基础(50)		100	22
分数总计					46

量判断, 有助于提高桥梁抗洪能力评估的准确性。

### 参考文献

- [1] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. (1995) Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges.
- [2] Landers, M.N. (1992) Bridge Scour Sata Management.
- [3] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. (2012) Evaluating Scour at Bridges. Fifth Edition.
- [4] 《公路桥涵养护规范》(JTG H11-2004) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [5] 李整, 陈代海. 函数模糊识辨法及其在桥梁抗洪能力评估中的应用[J]. 铁道建筑, 2013(2): 5-8.
- [6] 张贵宗. 桥梁适应性评定的关键技术研究[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(1): 209-212.
- [7] 彭子祥. 洪水环境下群桩基础桥梁易损性分析与评估[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [8] 《江市市青莲大桥检测报告》. 四川华腾公路试验检测有限责任公司, 2013.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
 期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)