

公路大跨度桥梁抗风性能评价方法

王爱勤¹, 李龙安²

(1. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064; 2. 中铁大桥勘测设计院有限公司, 湖北 武汉 430050)

摘 要:为精确判断公路大跨度桥梁的抗风稳定性等级,在公路大跨度桥梁设计阶段合理选择桥跨布置方案,选取扭弯频率比等结构影响参数和风攻角效应系数等场地参数,共计 12 个因子作为评价指标。采用模糊数学方法对公路大跨度桥梁的抗风稳定性能进行定量评价,将各种大跨度桥梁的抗风稳定性划分为稳定型、次稳定型、次不稳定型、不稳定型,并以已建大跨度悬索桥为工程算例进行抗风稳定性能的评价分析。结果表明:该研究方法对公路大跨度桥梁抗风稳定性能评定是可行的,经风洞试验结果对比也验证了该分析方法和结论的正确性。

关键词:桥梁工程;公路大跨度桥梁;抗风稳定性;评价指标;评价方法;风洞试验

中图分类号:U448.43

文献标识码:A

Evaluation method of wind-resistance capability of large-span bridge on highway

WANG Ai-qin¹, LI Long-an²

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. China Zhongtie Major Bridge Survey and Design Institute, Wuhan 430050, Hubei, China)

Abstract: For large-span bridges, in order to accurately evaluate their wind resistance level, the structure parameters, like frequency ratio of torsion and bending, and site factors, such as the effective coefficient of wind angle, totally 12 indexes are chosen as evaluating indicators in a fuzzy mathematics method to implement the evaluation quantitatively. Accordingly, large-span bridges can be classified as stable, second stable, second instable and instable totally four types. An existing large-span suspension bridge is taken as an engineering example to carry out the evaluation analysis of wind resistance level. The results show that the proposed method is feasible to evaluate the wind resistance level for large-span bridges. This conclusion is further strengthened by comparing the numerical simulation results with experimental data of wind tunnel tests. 4 tabs, 7 refs.

Key words: bridge engineering; large-span bridge on highway; wind-resistance stability; evaluating indicator; evaluating method; test of wind-tunnel

0 引 言

近十几年来,公路桥梁建设已进入了大跨度时代,斜拉桥的主跨已达 1 088 m(建设中的中国江苏的苏通长江大桥),悬索桥的主跨已接近 2 000 m 的跨度(已建成的日本明石海峡大桥主跨为 1 991 m)。大跨度桥梁有“塔高、跨大、索长、质轻、结构柔和阻尼弱”的特点,因而风荷载往往是大跨度桥梁设计的控制因素,这一观点随着英国泰伊(Tay)桥和美国塔科马(Tacoma)大桥的风毁事故而被桥梁设计者所重视。

在公路大跨度桥梁的抗风设计中,设计师所要考虑的除了风对结构的静力作用外,还要考虑风对结构的动力作用,一般来说,风对结构的动力作用比静力作用更加危险。在风对结构的动力作用的诸多振动中,有些是发散振动,如颤振和驰振;有些则为限幅振动,如涡激振和抖振。发散振动具有危险性,是一种“急性病”;限幅振动具有潜伏期,是一种“慢性病”。在大跨度桥梁的抗风设计中,既要避免“慢性病”的发生,更要严格控制“急性病”的发作。在方案设计阶段和工程设计阶段,如何尽快地诊断结构是否会发生“急性病”及其可能发生的程度就成为大跨度桥梁抗风设计的关键。现阶段的颤振稳定性的评价方法,均采用文献[1]的第 6.3 条进行,该评价方法公式简单,分级明确,但仅考虑了桥面的宽度、扭转基频的大小、桥址处的风速大小等 3 个因素。由于考虑的因素有限,在实际的抗风设计中往往达不到准确判断的目的。

本文选取结构影响参数如扭弯频率比等和风荷载参数如攻角效应系数等 12 个因素作为评价指标,利用模糊数学方法对大跨度桥梁的抗风稳定性能进行定性分析和定量评价;将各种大跨度桥梁的抗风稳定性划分为稳定型、次稳定型、次不稳定型、不稳定型,阐述了各种类型桥梁抗风能力的适用范围。研究成果对桥梁抗风设计有一定的指导意义。

1 现阶段的颤振稳定性评价

现阶段的公路大跨度桥梁的颤振稳定性的评价,采用文献[1]的第 6.3.1~6.3.3 条进行。

1.1 计算颤振稳定性指数 I_f

采用近似公式或简化公式计算大跨度桥梁的扭转基频,根据桥址处的气象资料确定出的主梁颤振检验风速,然后按式(1)计算颤振稳定性指数 I_f

$$I_f = \frac{[v_{cr}]}{f_t B}$$

(1)

式中:[v_{cr}]为颤振检验风速(m/s); f_t 为扭转基频(Hz); B 为桥面全宽(m)。

1.2 公路大跨度桥梁抗风稳定性分级

根据式(1)计算出的颤振稳定性指数 I_f 值,参照表 1 可以判断大跨度桥梁的抗风稳定性能。

表 1 公路大跨度桥梁抗风稳定性分级表

分级	I_f	抗风稳定性能	风洞试验要求及抗风措施
I	<2.5	十分安全	按文献[1]第 6.3.1 条公式计算,可以不必进行风洞试验
II	$2.5\sim4.0$	一般可以满足要求	颤振分析、节段模型风洞试验
III	$4.0\sim7.5$	要慎重对待	节段模型风洞试验、气动选型、颤振分析和全桥模型试验
IV	>7.5	必须采取抗风措施	详细全面的节段模型风洞试验、气动选型、颤振分析和全桥模型试验,必要时采用振动控制技术

从表 1 可看出:当桥面较宽,扭转基频较高,而桥址处的风速又较小时, I_f 值就较小,大跨度桥梁的抗风稳定性就越好;反之,当桥面较窄,扭转基频较低,而桥址处的风速又较大时, I_f 值就较大,大跨度桥梁的抗风稳定性就越差^[2-3]。

2 抗风稳定性评价指标的选取

公路大跨度桥梁抗风稳定性评价,主要是评估强风对桥梁结构的危害性有多大,一般可表示为风对结构的危害性=桥址处风环境的严峻性+桥梁结构的易损性。因此,公路大跨度桥梁抗风稳定性评价,主要是在公路大跨度桥梁的抗风能力和桥址处的风环境两大部分因素综合分析的基础上进行的。而这两大部分所包含的决定公路大跨度桥梁抗风稳定的因素有很多,本文根据公路大跨度桥梁的特性尤其是桥址处风环境的特点,选取扭弯频率比等 7 个结构因子和攻角效应系数等 5 个场地因子作为全部的评价指标。公路大跨度桥梁的各评价指标的名称和定义见表 2。

3 抗风稳定性分级标准的确定

将大跨度桥梁抗风稳定性评价这一问题定义为有限论域 X ,将影响大跨度桥梁抗风稳定性的以上 12 个因素作为有限论域中的各个元素,依次为 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$,则该有限论域可表示为^[3,9]

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}\}$$

(2)

表 2 公路大跨度桥梁的各评价指标的名称和定义

影响因素编号	评价指标名称	评价指标定义
结构影响参数	1 扭弯频率比 ϵ	$\epsilon=f_t/f_b, f_b, f_t$ 分别为主梁(加劲梁)的最低阶竖弯和扭转自振频率
	2 桥面质量与空气的密度比 μ	$\mu=m/(\pi\rho b^2)$, 其中: m 为桥面系及主缆单位长度(kg/m); ρ 为空气的密度(kg/m ³); b 为主梁断面半宽(m)
	3 主梁(加劲梁)的惯性半径比 r/b	$\frac{r}{b}=\frac{1}{b}\sqrt{\frac{I_2+I_3}{A}}$, 其中: A, I_2, I_3 分别为主梁(加劲梁)的面积和惯性矩
	4 主梁(加劲梁)的全宽 B (m)	$B=2b$
	5 最低阶竖弯自振频率 f_b (Hz)	f_b 为主梁(加劲梁)的最低阶竖弯自振频率
	6 最低阶扭转自振频率 f_t (Hz)	f_t 为主梁(加劲梁)的最低阶扭转自振频率
	7 断面形状影响系数 η_s	η_s 为与主梁(加劲梁)的断面形状有关的影响系数
风荷载参数	8 风的攻角效应系数 η_α	η_α 为与风的攻角(主流方向与水平面产生的夹角)有关的影响系数
	9 风的偏角效应系数 η_β	η_β 为与风的偏角(主流方向与桥轴平面产生的夹角)有关的影响系数
	10 基本风速 V_{10} (m/s)	V_{10} 为开阔平坦地貌条件下, 地面以上 10 m 高度处, 100 a 重现期的 10 min 平均年最大风速
	11 地表粗糙度系数 α	反映大气边界层中地表起伏或地物高矮稀密程度的影响系数
	12 基准高度 z (m)	确定桥梁主要构件距水面或某一平面的计算高度

将大跨度桥梁抗风稳定性分级定义为评价集 V , 按大跨度桥梁的抗风稳定性能的差异共分 4 个级别, 即: 稳定型 V_1 ; 次稳定型 V_2 ; 次不稳定型 V_3 ; 不稳定型 V_4 。

$$V=\{V_1,V_2,V_3,V_4\}$$

(3)

各评价因素分级标准见表 3。

表 3 中, 当评价因子 x_i 正好位于某个分级标准中间, 对应此稳定级隶属程度 $\mu=1$; 当评价因子 x_i 正好位于分级界线上, 对应界线相邻的两级的隶属程度 $\mu=0.5$; 当评价因子 x_i 位于某个分级标准之间(不在中间), 稳定级隶属程度按线性内插法确定, 对应此稳定级隶属程度 $0.5<\mu<1^{[4]}$ 。

4 抗风稳定性评价模型的建立

大跨度桥梁抗风稳定性的决定因素是多方面的, 各个因素对大跨度桥梁抗风稳定性的影响程度也不尽相同, 其各自作为刻画大跨度桥梁抗风稳定性的级别的标志与界限具有外延的模糊性。因此, 采用模糊数学的方法进行大跨度桥梁抗风稳定性评价将更为合理。

表 3 大跨度桥梁抗风稳定性影响因素分级标准

因子		稳定 型 V_1	次稳定 型 V_2	次不稳 定型 V_3	不稳定 型 V_4	
结构 因子	扭弯频率比	x_1	>3.0	$2.0 \sim 3.0$	$1.5 \sim 2.0$	$1.0 \sim 1.5$
	密度比	x_2	>50	$35 \sim 50$	$20 \sim 35$	<20
	惯性半径比	x_3	>0.5	$0.4 \sim 0.5$	$0.3 \sim 0.4$	<0.3
	主梁全宽度/m	x_4	>35	$25 \sim 35$	$15 \sim 25$	<15
	竖弯基频/Hz	x_5	>0.4	$0.3 \sim 0.4$	$0.2 \sim 0.3$	<0.2
	扭转基频/Hz	x_6	>1.6	$0.8 \sim 1.6$	$0.4 \sim 0.8$	<0.4
	形状系数	x_7	>0.8	$0.6 \sim 0.8$	$0.4 \sim 0.6$	<0.4
风 参 数 因 子	攻角系数	x_8	$0.9 \sim 1.0$	$0.7 \sim 0.9$	$0.5 \sim 0.7$	<0.5
	偏角系数	x_9	>0.9	$0.6 \sim 0.9$	$0.4 \sim 0.6$	<0.4
	基本风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	x_{10}	<25	$25 \sim 35$	$35 \sim 45$	>45
	地表粗糙 度系数	x_{11}	0.30	0.22	0.16	0.12
	基准高程/m	x_{12}	<20	$20 \sim 40$	$40 \sim 60$	>60

4.1 隶属度的确定

某一影响因素 x_i 对评价集 V 中某一稳定级别 V_i 的隶属程度随 x_i 数值变化而变化, 将论域 X 中的每个影响因素 x_i 隶属 V 的函数定义为 X 的模糊集 A , 则表示为

$$A=\{\mu B(x_1), \mu B(x_2), \mu B(x_3), \mu B(x_4), \mu B(x_5), \mu B(x_6), \mu B(x_7), \mu B(x_8), \mu B(x_9), \mu B(x_{10}), \mu B(x_{11}), \mu B(x_{12})\}$$

(4)

式(4)中, $0\leq\mu B(x_i)\leq1, x_i\in X, \mu B(x_i)$ 表示第 i 个影响因素对评价集 V 中不同级别的影响程度, 称为隶属度。隶属度可由隶属函数或工程经验给出。本文的影响因素 x_i 均为连续变化的定量指标, 故可采用连续分布函数作为隶属函数。

4.2 权值分配原则

各个评价因子对大跨度桥梁抗风稳定性的作用大小不同, 在评价计算模型中通过对各个评价因子给予不同的权值来平衡各个评价因子的差别, 权值分配原则按表 4 进行。

根据以上的权值取值原则, 进行各因子的权值分配, 设各因子 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$ 的权值分别为 $B(1), B(2), B(3), B(4), B(5), B(6), B(7), B(8), B(9), B(10), B(11), B(12)$, 则权值子集 B 为 $B=\{B(1), B(2), B(3), B(4), B(5), B(6), B(7), B(8), B(9), B(10), B(11), B(12)\}=\{0.11, 0.10, 0.08, 0.10, 0.09, 0.08, 0.08, 0.07, 0.08, 0.07, 0.06\}$

(5)

表 4 大跨度桥梁抗风稳定性的各评价因子的权值分配原则

权值分配方法	权值选取原则	
	取较大值的原则	取较小值的原则
按影响程度的大小划分	影响较大者	影响较小者
按评价因子相关程度大小划分	仅影响最终的评价值,而不影响其他的评价因子	影响最终的评价值,且也影响其他的评价因子
按评价因子的可信程度大小划分	已通过风洞试验验证;有成熟的工程经验。	未通过风洞试验验证;无成熟的工程经验。

4.3 评价模型的建立

根据隶属度的确定,计算出有限论域 X 中各指标对于评价集 V 中各级别隶属度,构成论域 X 对评价集 V 的模糊关系矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & r_{1,4} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & r_{2,4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{12,1} & r_{12,2} & r_{12,3} & r_{12,4} \end{bmatrix} \tag{6}$$

公路大跨度桥梁稳定性分级可由稳定性分级模糊向量 C 确定

$$C = (c_1, c_2, c_3, c_4) \tag{7}$$

式(7)表示评判大跨度桥梁隶属不同级别的相对数值,可由 B 和 R 乘积的模糊运算求出,表示为

$$C = B \cdot R = \{B(1), B(2), \cdots, B(12)\} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & r_{1,4} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & r_{2,4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{12,1} & r_{12,2} & r_{12,3} & r_{12,4} \end{bmatrix} = (c_1, c_2, c_3, c_4) \tag{8}$$

4.4 评价原则

根据最大隶属度原则,式(7)中 c_i 值中最大者即为所评判的桥梁的稳定性级别。

5 工程算例

本文以已建成通车的广东汕头海湾大桥为例,对评价过程进行说明^[5-7]。

5.1 工程概况及有关参数

汕头海湾大桥位于广东汕头的妈屿岛处,是跨越汕头海湾的悬索桥,主跨为 452 m,全长 2 420 m,于 1995 年建成。该桥桥址处是中国遭受台风侵袭十分频繁的地区之一,每年台风所造成的损失巨大,因此,本桥的抗风设计十分重要。

成桥状态各评价因子的数值如下:扭弯频率比 $x_1=4.26$;密度比 $x_2=62.9$;惯性半径比 $x_3=0.60$;

主梁宽度 $x_4=24.72$ m;竖弯基频 $x_5=0.1917$ Hz;扭转基频 $x_6=0.5860$ Hz;形状系数 $x_7=0.75$;攻角系数 $x_8=0.7$;偏角系数 $x_9=0.45$;基本风速 $x_{10}=47$ m/s;地表粗糙度系数 $x_{11}=0.12$;基准高程 $x_{12}=50$ m。

5.2 求模糊关系矩阵 R

$$R = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.50 & 0.50 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.50 & 0.50 \\ 0.00 & 0.00 & 0.90 & 0.10 \\ 0.25 & 0.75 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.50 & 0.50 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.75 & 0.25 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \end{bmatrix} \tag{9}$$

5.3 求模糊评价向量 C

$$C = B \cdot R = (0.31, 0.15, 0.325, 0.215) \tag{10}$$

由式(10)的计算结果和本文的评价原则可知,汕头海湾大桥的抗风稳定性分级为次不稳定型。

5.4 与风洞试验的比较

由全桥模型风洞试验(西南交通大学风工程试验研究中心)得出汕头海湾大桥的颤振临界风速 $v_{cr}=135$ m/s,高出本桥成桥阶段的主梁颤振检验风速 $[v_{cr}]=96.5$ m/s 的 40%。

对本桥来说,当 $v_{cr}/[v_{cr}] \geq 4.0$ 时,抗风稳定性分级可划为稳定型;当 $2.5 \leq v_{cr}/[v_{cr}] < 4.0$ 时,抗风稳定性分级可划为次稳定型;当 $1.3 \leq v_{cr}/[v_{cr}] < 2.5$ 时,抗风稳定性分级可划为次不稳定型;当 $v_{cr}/[v_{cr}] < 1.3$ 时,抗风稳定性分级可划为不稳定型。由此可见,采用本文研究方法给出的结论与该桥风洞试验的结论吻合很好。

6 结 语

(1) 大跨度桥梁抗风稳定性是大跨度桥梁结构设计的关键,由于影响因素的多样性和复杂性,目前的抗风稳定性分级是按文献 [1] 的第 6.3.1~6.3.3 条进行,这些条目用简单的公式进行评判,将一个不确定的问题用一种确定的方法来解决,其方法不妥。

参考文献:

References:

[1] 冯文凯,石豫川,柴贺军,等. 缓倾角层状高边坡变形破坏机制物理模拟研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2):32-36.
FENG Wen-kai, SHI Yu-chuan, CHAI He-jun, et al. Study of mechanism of deformation failure of a low-angle bedded high slope with physical simulation method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 32-36.

[2] Adhikary D P, Dyskin A V. A Cosserat continuum model for layered materials [J]. Computers and Geotechnics, 1997, 20(1): 15-45.

[3] 刘俊,黄铭. 层状岩体开挖的空间弹性偶应力理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 276-280.
LIU Jun, HUANG Ming. Analysis on layered rock mass excavated with spatial elastic couple-stress theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineer-

ing, 2000, 19(3): 276-280.

[4] Provids E, Kattis M A. Finite element method in plane Cosserat elasticity [J]. Computers and Structures, 2002, 80: 2059-2069.

[5] Adhikary D P, Guo H. An orthotropic Cosserat elastic-plastic model for layered rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35(3): 161-170.

[6] 王启耀. 陡倾角层状岩体中大型地下洞室群围岩变形的预报与控制[D]. 上海:同济大学, 2004, WANG Qi-yao. Displacement prediction and safety control of surrounding rock of huge openings in layered rock mass with steep dip angle [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.

[7] 张天军,李云鹏. 顺层围岩地下洞室的粘弹性稳定[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2004, 24(4):55-58. ZHANG Tian-jun, LI Yun-peng. Viscoelastic stability of cavity bedding wall rock[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(4): 55-58.

(上接 61 页)

(2) 本文根据公路大跨度桥梁的特性尤其是桥址处风环境的特点,选取扭弯频率比等 7 个结构因子和攻角效应系数等 5 个场地因子作为全部的评价指标,利用模糊数学方法对大跨度桥梁的抗风稳定性进行定量评价,将各种大跨度桥梁的抗风稳定性划分为稳定型、次稳定型、次不稳定型、不稳定型。

(3) 本文提出的研究方法有计算简便、准确度高的特点,运用该方法可以比较快速地判定某一大跨度桥梁的抗风能力的大小,给出的工程算例的结论与风洞试验是吻合的,研究成果对公路大跨度桥梁抗风设计有重要的参考价值。

参考文献:

References:

[1] JTG/TD60-01-2004. 公路桥梁抗风设计规范[S]. JTG/TD60-01-2004. Wind-resistant design specification for highway bridges[S].

[2] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社,1992.
LI Guo-hao. The bridge structure stability and vibration[M]. Beijing: China Railway Press, 1992.

[3] 汪培庄. 模糊集合论及其应用[M]. 上海:上海科技出版社, 1983.
WANG Pei-zhuang. Fuzzy set theory and application

[M]. Shanghai: Shanghai Sci-Tech Press, 1983.

[4] 张金武,李龙安. 公路桥梁抗风设防标准的初探[J]. 桥梁建设, 2002, (3):29-32.
ZHANG Jin-wu, LI Long-an. Discussion and study about anti-wind design criteria for highway bridges[J]. Bridge Construction, 2002, (3): 29-32.

[5] 许世展,高传明,贺拴海,等. 悬索桥主塔纵向稳定的实用计算[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2005, 25(1):41-47.
XU Shi-zhan, GAO Chuan-ming, HE Shuan-hai, et al. Practical calculating method for main tower length-wise buckling of suspension bridge [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(1):41-47.

[6] 胡建华,王修勇,陈政清,等. 斜拉索风雨振响应特性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 41-48.
HU Jian-hua, WANG Xiu-yong, CHEN Zheng-qing, et al. Response characteristics of wind-rain induced vibration of stay cables[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 41-48.

[7] 吕颖钊,贺拴海. 缺损钢筋混凝土梁桥模糊可靠性评价模型[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(4):58-62.
LU Ying-zhao, HE Shuan-hai. Fuzzy reliability evaluation of defective RC beam bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 58-62.