

风洞在桥梁抗风研究中的应用

李会知,李思堂,吴义章

(郑州大学土木工程学院 河南 郑州 450002)

摘 要 :桥梁应具有抵抗风作用的能力 ,风对桥梁的作用不单纯是平均风的静力作用 ,特别是大跨度桥梁 ,其柔性较大 ,设计时必须考虑颤振、抖振、涡激振动等空气动力问题 .通过风洞模型试验来确定桥梁风荷载和抗风性能是大跨度柔性桥梁抗风研究的主要手段 .风洞试验主要包括桥梁节段模型静力试验、节段模型动力试验、全桥气动弹性模型试验等几个方面 .
关键词 :桥梁 ;风荷载 ;颤振 ;节段模型 ;风洞试验
中图分类号 :TV 322 文献标识码 :A

0 引言

桥梁要受到风的作用 ,历史上发生过 10 多起没有恰当考虑风的作用而“风至桥塌”的事故^[1],这充分说明了桥梁抗风的重要性 .在这些事故中 ,最值得提出是美国塔可马桥(Tacoma)的垮塌 .1940 年 11 月 7 日 ,竣工仅 4 个月、中跨 853 m 的塔可马桥在远低于设计风速的 19 m/s(相当于 8 级风)风速下发生颤振而垮塌 ,这次事故震惊了世界桥梁界 ,使人们认识到大跨度桥梁设计只考虑静态风荷载还远远不够 ,一定还存在风致振动机理威胁着桥梁的安全 ,并由此促成了风工程这一边缘学科的兴起和发展^[2,3].为研究塔可马桥垮塌的原因 ,华盛顿大学专门建了一座 1.2 m × 30.5 m 吹风口的风洞进行试验研究 .现在人们已认识到大跨度桥梁的设计必须考虑颤振、抖振和涡激振动等空气动力问题^[4].

由于桥梁是复杂的三维非流线型钝体结构以及桥梁的气动弹性效应 ,现有的理论水平难以满足大跨度桥梁结构抗风设计的需要 ,还得依赖桥梁模型风洞试验研究桥梁的抗风性能 .本文主要介绍通过风洞模型试验确定桥梁风荷载和抗风性能的方法 ,包括桥梁节段模型静力试验、节段模型动力试验、全桥气动弹性模型试验等几个方面 .

1 节段模型静力试验

通过桥梁节段模型的静力三分力风洞试

验^[4] ,可以为桥梁提供设计风荷载和驰振稳定性判断依据 .

按照一定的几何比例制作一段代表性的跨向刚性模型(节段模型) ,利用三分量天平在风洞中测量节段模型在不同风速、风向下的阻力 F_D ,升力 F_L 和扭矩 M ,变换成阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 和扭矩系数 C_M 给出 :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 B L}, C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 B L}, C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V^2 B^2 L}$$

式中 : ρ 为空气密度 ; V 为来流风速 ; B, L 分别为模型桥面宽和模型长 .

在进行模型试验时 ,要求 :①保持雷诺数相似 ,特别对于较流线型的断面 ,缩尺模型的雷诺数效应可能使气动力系数不真实 ,应研究其气动等效性 .②尽量消除模型端部的三元流效应 ,一种措施是在模型端部加端板 ,但是在试验中很难保证端板完全平行于来流 ,如果端板不平行于来流 ,会带来很大的系统误差 ;另一种措施是在节段模型两端加长模型但不测加长段的力 .③保证模型的刚度 .

测出了桥梁的阻力、升力和扭转力矩系数后 ,除了可以确定桥梁的设计风荷载外 ,还可以考查桥梁的驰振稳定性 ,如果出现负升力斜率值大于

阻力系数,结构很可能出现竖向驰振失稳,通过公式表达就是:如果 $C_D + \frac{dC_L}{d\alpha} < \alpha$ (其中 $\frac{dC_L}{d\alpha}$ 是升力系数随风向攻角的变化率),结构就会出现不可逆转的发散失稳。气动扭转力矩也可能引起结构失稳,这就是扭转发散或称为侧向屈曲,临界风速为

$V_c = [2K_\alpha / (\rho B^2 dC_M / d\alpha)]^{1/2}$ (K_α 是抗扭刚度),可以看出,只要 $\frac{dC_M}{d\alpha} > 0$,理论上扭转发散总是存在的。通常来说,对于桥梁结构,只有那些扭转刚度很弱的桥,在实际可达到的风速下才存在扭转发散的危險。

节段模型静力试验得出的是二维情况下的力参数,虽然说在应用到较长的桥梁中是有效的,但与其与三维实桥的相关性(或者说应用时的偏差)应加强研究。

2 节段模型动力试验

节段模型动力试验是初步评价桥梁颤振特性的有效手段。相比较来说,全桥气动弹性模型的制作要求非常精细、造价高,而且,设计改变就要重新制作模型,而节段模型造价则低得多,在初步设计阶段,利用节段模型动力试验进行断面选型和初步评估桥梁抗风特性是经济而又有效的手段。

2.1 确定桥梁颤振临界风速

设计大跨度桥梁最关心的问题之一就是桥梁是否会出现颤振失稳。一般来说,从桥址处环境风的统计规律确定出桥梁设计风速 V_D ,实际桥梁颤振临界风速应高于 $1.2V_D$,这样才能避免破坏性的颤振发生。桥梁节段模型试验可以确定桥梁颤振临界风速。

节段模型是按缩尺比制成的、有代表性的跨向节段,两端由弹簧支承,允许作竖向和扭转运动,通常还用两块端板夹住,以减小端部的三维气动力效应。模型除满足几何相似之外,还应满足下列无量纲的动力参数相等^[5]:惯性参数 $\frac{m}{\rho B^2}$, $\frac{I}{\rho B^4}$; 风速参数 $\frac{V}{\omega_b B}$, $\frac{V}{\omega_t B}$; 阻尼参数 ζ_b , ζ_t 。其中, m , I 分别为质量和转动惯量; V 为风速; ω_b , ω_t 分别为竖向振动频率和扭转振动频率; ρ 为空气密度; B 为桥面宽度; ζ_b , ζ_t 分别为竖向阻尼系数和扭转阻尼系数。

满足上述相似条件后,根据模型试验得出的颤振临界风速,可推算出实桥颤振临界风速。

2.2 颤振导数测量

利用节段模型动力试验直接确定的是二维情况下的颤振临界风速,在应用到实桥中会有有一定的偏差。通过节段模型动力试验求得桥梁振动的颤振导数,可以利用颤振导数对桥梁的颤振特性作出解析分析,这是一种半实验半理论的方法,技术性很强,而且是建立在两点假设的基础上的:①自激力的大小与振动位移和速度成正比(线性假设);②颤振导数只与桥梁外形和折算频率有关。

在以上两点假设下,节段模型振动方程为:

$$\begin{aligned} m(\ddot{h} + 2\zeta_h\omega_h\dot{h} + \omega_h^2h) &= \frac{1}{2}\rho V^2 B \left(KH_1 \frac{\dot{h}}{V} + KH_2 \frac{B\dot{\alpha}}{V} + K^2 H_3 \alpha + K^2 H_4 \frac{h}{B} \right); \\ K(\ddot{\alpha} + 2\zeta_a\omega_a\dot{\alpha} + \omega_a^2\alpha) &= \frac{1}{2}\rho V^2 B \left(KA_1 \frac{\dot{h}}{V} + KA_2 \frac{B\dot{\alpha}}{V} + K^2 A_3 \alpha + K^2 A_4 \frac{h}{B} \right), \end{aligned}$$

式中: K 为折算频率; H_i , A_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 为颤振导数; H_2 , H_3 , A_1 , A_4 为耦合颤振导数; H_1 , H_4 , A_2 , A_3 为非耦合颤振导数。

下面先简要介绍 A_2 , A_3 的一种求法。

约束模型使其只作扭转运动,则振动方程为

$$K(\ddot{\alpha} + 2\zeta_a\omega_a\dot{\alpha} + \omega_a^2\alpha) = \frac{1}{2}\rho V^2 B \left(KA_2 \frac{B\dot{\alpha}}{V} + K^2 A_3 \alpha \right), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{即} \quad \ddot{\alpha} + \left(2\zeta_a\omega_a - \frac{\rho VB^3 KA_2}{2I} \right) \dot{\alpha} + \left(\omega_a^2 - \frac{\rho V^2 B^2 K^2 A_3}{2I} \right) \alpha &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ζ_a , ω_a 分别为零风速下模型的阻尼比和振动固有频率。

在来流条件下,自由振动方程又可写为

$$\ddot{\alpha} + 2\zeta_{ae}\omega_{ae}\dot{\alpha} + \omega_{ae}^2\alpha = 0, \quad (3)$$

其中, ζ_{ae} , ω_{ae} 分别为气流中模型振动的阻尼比和振动固有频率。

比较方程(2)(3),可知

$$2\zeta_{ae}\omega_{ae} = 2\zeta_a\omega_a - \frac{\rho VB^3 KA_2}{2I},$$

$$\omega_{ae}^2 = \omega_a^2 = \omega_a^2 - \frac{\rho V^2 B^2 K^2 A_3}{2I};$$

又

$$K = \frac{B\omega_{ae}}{V},$$

$$\begin{cases} A_2 = \frac{4I}{\rho B^4} \left[\zeta_a \left(\frac{\omega_a}{\omega_{ae}} \right) - \zeta_{ae} \right], \\ A_3 = \frac{2I}{\rho B^4} \left[\left(\frac{\omega_a}{\omega_{ae}} \right)^2 - 1 \right]. \end{cases} \quad (4)$$

其中： I, ρ, B 分别为转动惯量、空气密度、桥面宽。在试验中，在无风和有风工况下，分别通过初始位移条件下的自由衰减振动模态分析可以求出 $\zeta_\alpha, \omega_\alpha, \zeta_{\alpha\epsilon}, \omega_{\alpha\epsilon}$ 。因此可求得非耦合颤振导数 A_2, A_3 。同理，约束模型使其只作竖向运动，则可求得非耦合颤振导数 H_1, H_4 。

这种分状态自由振动测试法只能直接测量非耦合颤振导数，可用来分析单自由度的颤振。至今已经发展了几种测试所有颤振导数的方法^[6~8]，但仍存在试验难度大、试验精度有待提高的问题。测出了所有的颤振导数后，在知道涡激力、抖振力（来流紊流力）的条件下，就能分析桥梁的颤抖振特性。但要得到更精确的结果，则需对颤振导数与来流紊流度及振动幅度的关系、桥梁模型的雷诺数效应、涡激力和抖振力的物理模型等多个方面作进一步精细化的研究。

3 全桥气动弹性模型试验

节段模型静力试验和动力试验因其试验周期短、花费少，在桥梁初步设计阶段的断面选型和颤振分析方面具有优越性，但因为线性假设及物理模型的近似性等要全面反映整个桥梁的动力特性和抗风性能（包括颤振、抖振和涡激振动等），全桥气动弹性模型风洞试验就具有不可替代的作用。设计新颖的大跨度桥梁最终都应该利用全桥气动弹性模型试验进行抗风稳定性评估。

气动弹性全桥模型试验除了满足几何相似之外，还应该满足表 1 给出的相似参数一致。

表 1 相似参数

Table 1 Similar Parameter

参数	表达式	意义或说明
质量(惯性参数)	$\frac{m}{\rho B^2}$	结构物惯性力 mV^2 气动惯性力 $\rho B^2 V^2$
质量惯矩(惯性参数)	$\frac{I_m}{\rho B^4}$	结构物惯性力矩 气动惯性力矩
弹性参数	$\frac{EA}{\rho V^2 B^2}$	结构物弹性力 EA 气动惯性力 $\rho B^2 V^2$
刚度参数	$\frac{EI}{\rho V^2 B^4}$	-
自由扭转刚度参数	$\frac{GK}{\rho V^2 B^4}$	-
重力参数(Froude 数)	$\frac{gB}{V^2}$	结构物重力 $\rho B^3 g$ 气动惯性力 $\rho B^2 V^2$
Strouhal 数	$\frac{nB}{V}$	折算频率

在制作模型时，利用钢或铝芯梁满足刚度参

数，利用铅块调整质量分布以满足惯性参数，利用木制表层满足几何相似，为消除木制表层对刚度的影响，每隔一定的长度将表层截断。

在试验中，可以利用加速度计、位移计和应变片电桥多种手段测量振动的振幅、主梁内力矩，分析振动模态，判断桥梁颤振、抖振、涡激振动特性等^[10]。

据研究^[11]，一些桥梁在某种施工工况下，其破坏性的颤振临界风速要比成桥状态低得多，甚至只有成桥状态的 20%，因此，在试验中还应设计几种有代表性的施工工况进行试验研究。

4 结束语

实践已经证明，抗风稳定性是控制大跨度桥梁成败的关键性因素之一。在大跨度桥梁的设计中，不仅要考虑承受风荷载的静力强度问题，还必须考虑空气动力稳定性问题。钝体空气动力学理论上的困难使得桥梁模型风洞试验是桥梁抗风性能研究的主要手段，风洞试验包括桥梁节段模型静力试验、节段模型动力试验、全桥气动弹性模型试验、风环境模拟等多个方面，虽然风洞试验为桥梁抗风设计提供了强有力保障，但试验理论和试验方法仍需作精细化的改进和发展。

参考文献：

[1] 项海帆. 结构风工程研究的现状和展望[J]. 振动工程学报, 1997(3): 258-263.

[2] WYATT T A. Bridge aerodynamics 50 years after Tacoma Narrows, part I: The Tacoma Narrows failure and after [J]. Journal of Wind Engineering and Aerodynamics, 1992, 40: 317-326.

[3] WALSH D E, WYATT T A. Bridge aerodynamics 50 years after Tacoma Narrows, part II: A new discipline world-wide [J]. Journal of Wind Engineering and Aerodynamics, 1992, 40: 327-336.

[4] 埃米尔·希缪, 罗伯特·斯坎伦. 风对结构的作用——风工程导论[M]. 刘尚培, 项海帆, 谢霖明, 译. 上海: 同济大学出版社, 1992.

[5] 项海帆. 公路桥梁抗风设计指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.

[6] SCANLAN R H. Airfoil and bridge deck flutter derivatives [J]. ASCE J of Engineering Mechanics, 1971, 97(6): 1717-1937.

[7] KNMARASENA T, SCANLAN R H, FAZL Ehsan. Recent observations in bridge deck aeroelasticity [J]. J of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1992, 40(2): 225-247.

(下转 66 页)

Application of Ground Penetrating Radar in Pavement Quality Testing

TAO Xiang - hua¹ , YUAN Li - ying² , WANG Fu - ming¹ , YUE Jin - chao¹

(1. College of Environmental & Hydraulic , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002 , China ; 2. Zhengzhou Municipal Administration Engineering Corporation , Zhengzhou 450024 , China)

Abstract :Ground Penetrating Radar(GPR) is a new - type nondestructive tool. More and more GPR equipment is used in highways and roads around the world in recent years , applications have focused on measuring pavement thickness , material evaluations and pavement deterioration investigations in pavement quality evaluations. A case is used to illustrate the applications of GPR that include pavement thickness measurements and voids detection under concrete slabs. It has been proved that a continuous ,fast and precise measuring data may be obtained by applying GPR. GPR is suitable for spreading around all the country.

Key words :nondestructive testing ; GPR ; thickness ; voids ; pavement

(上接 55 页)

[8] 李明水 ,贺德馨 ,李会知.桥梁节段模型颤振导数的确定[J].工程力学 ,1995(1) :120 - 125.

[9] 顾 明 ,张若雪 ,项海帆.桥梁气动导数的识别及模型参数对气动导数的影响[M].振动工程学报 ,1997(4) :420 - 426.

[10] 李会知 ,陈 忻 ,李明水 ,等.西陵长江大桥全桥气动弹性模型风洞试验研究[J].空气动力学学报 ,1997(4) :513 - 518.

[11] 李会知 ,陈 忻 ,李明水 ,等.大跨度悬索桥施工状态气动弹性模型风洞试验研究[J].实验力学 ,1997(3) :383 - 388.

Application of Wind Tunnel to Study of Wind Effect on Bridge

LI Hui - zhi , LI Si - tang , WU Yi - zhang

(College of Civil Engineering , Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002 ,China)

Abstract :Bridges should be capable of withstanding wind effect. The flutter ,buffeting and vortex - induced vibration may occur in the case of large - span suspension bridge. Wind effect on bridge can be predicted by wind tunnel modeling test. This paper introduces static force test with section model and vibration test with aeroelastic model.

Key words :bridge ; wind load ; flutter ; segment model ; wind tunnel test