

文章编号 0258-2724(2001)01-0008-04

大跨度刚构桥悬臂施工状态的抗风性能研究

郑史雄， 廖海黎， 周述华

(西南交通大学土木工程学院，四川 成都 610031)

摘 要：以主跨为 190 m 的预应力混凝土三跨连续刚构桥作为研究对象，通过气弹模型风洞试验，讨论了平行两幅迎风侧梁与背风侧梁的 6 分力特性，不同风向偏角对刚构桥风致响应的影响，然后，结合试验结果和数值计算，比较分析了横向连系对平行两幅梁风致响应的抑振作用，分析表明，对于由平行两幅箱梁组成的大跨度刚构桥，其悬臂施工时将两梁横向相连对减少结构的风振横向响应是十分有效而便利的。
关键词：风洞试验，刚构桥，抗风性能
中文分类号：U448.23 文献标识码：A

Study on Wind Resisting Performance of Long-Span Rigid Frame Bridge
in Its Cantilever Construction Stage

ZHENG Shi-xiong , LIAO Hai-li , ZHOU Shu-hua

(School of Civil Eng. , Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031 , China)

Abstract : In this paper , the study is conducted around a three span prestressed concrete (PRC) continuous rigid frame bridge with a main span of 190 m and consisting of two parallelly-arranged roadway box girders . By wind tunnel tests of an aeroelastic model , the aerodynamic coefficients of the front and rear girders are discussed and the effect of horizontal angle of airflow β on these coefficients is also studied . Then , a measurement using the thin plate to connect horizontally the two parallelly-arranged box girders is taken , and its vibration suppressing effect on the wind induced response is analytically discussed . It is shown that for long span rigid frame bridges with two parallelly-arranged roadway box girders , connecting horizontally the two girders in cantilever construction stage can reduce the wind induced horizontal vibration response effectively and easily .
Key words : wind tunnel tests ; rigid frame bridge ; wind resistance

大跨度刚构桥由于其施工和造价上的优势成为一种很有竞争力的桥型，但由于其上部结构悬臂施工长度长、自重、墩体又常采用薄壁墩，其最大双悬臂状态的振动频率往往较低，因而风致振动和风致结构内力就成为桥梁设计、施工者们十分关心的问题。目前我国高速公路刚构桥，由于桥面要求较宽，常将上部结构按上、下行分为两幅，桥面净间距一般较小，两幅梁的截面相同为单箱单室变截面箱梁，每幅梁下的墩身各自由两平行布置的薄壁箱形截面墩板组成。现以一预应力混凝土三跨连续刚构桥作为研究对象，结合风洞试验和数值计算，详细分析了在最大双悬臂施工状态的抗风性能以及应采取相应的制振措施。

1 风洞试验气弹模型

某预应力混凝土三跨连续刚构桥，其跨径组成为(105 + 190 + 105)m。上部结构按上、下行分为两幅，两幅桥面净间距为 1.05 m，两幅梁的截面相同。每幅主梁为一单箱单室变截面箱梁，桥面宽为 13.5 m。墩身由两平行布置的薄壁箱形截面墩板组成。采用悬臂法施工，最大双悬臂时单边悬臂长达 93.75 m。

根据力学相似理论,在结构模型风洞试验中,要求原型(实桥)和模型之间的弹性参数、质量参数和重力参数等严格一致,即模型与原型的几何外形和动力特性均相似,同时风洞内的流场也与实际流场相似。

关于雷诺数的一致性条件(粘性参数),在目前缩尺模型风洞试验中无法满足,只能予以放弃。国内外已有研究表明,对于桥梁结构这类钝体,雷诺数条件并不显著影响其绕流的流态相似^[2]。

大跨度刚构桥最大双悬臂施工状态下主梁的风致竖向振动和横向振动分别主要由主梁的竖摆和横摆构成,其余高阶模态的贡献率甚低,根据结构动力特性的上述特点,在模型设计时可以以主梁的竖摆和横摆这两个基阶模态为目标进行模拟。

由于主梁的竖摆和横摆两基阶模态主要取决于双壁墩的刚度,因而在设计模型时,可仅要求双壁墩满足弹性参数和质量参数一致性条件,主梁满足质量参数一致和墩顶处弹性参数一致性条件。这样设计模型的好处在于,模型主梁制作时不必采用传统分段留有缝隙的做法,从而使模型主梁的气动外形达到与实桥完全几何相似,最大限度地降低对主梁绕流相似性的损害。试验在西南交通大学工业风洞(XNJD-1)的第一试验段中进行,断面尺寸为 3.6 m(宽)×3.0 m(高),模型的几何比尺取为 $C_L = 1/60$,则风速比为 $C_V = 1/\sqrt{60} = 1/7.75$,频率比为 $C_f = \sqrt{60}/1 = 7.75/1$,加速度比 $C_a = 1/1$ 。

模型双壁墩的刚度由 A3 钢制成的芯梁提供,外形用红松木制成,用铅块调节质量。

由于实桥的两幅梁相互独立,施工时两幅梁同时施工,同时达最大双悬臂状态,因而其模型也由相互独立的两幅组成,两幅模型尺寸相同。

为了检验模型的结构动力特性是否与原型计算值之间满足相似关系,文中采用自由振动法测量了模型的频率和模态阻尼比。模态测试表明,所制作的模型其结构阻尼比仅为 0.001 左右,这与实桥经验值相差较大,而风致振动又十分依赖于结构的阻尼比。因此,为了得到合理的试验结果,应采取措施对模型的阻尼比加以调节。现采用了在模型上贴橡胶片和外加油箱阻尼器等方法提高模型的阻尼。

再次模态试验表明,经阻尼调节后,模型的横摆振动频率为 1.834 Hz,阻尼比达到 0.5%。竖摆振动频率为 4.512 Hz,阻尼比为 0.3%,而实桥对应计算频率则分别为 0.230 6 Hz 和 0.566 4 Hz,换算到模型分别为 1.786 Hz 和 4.387 Hz,可见,模型的频率与要求值吻合良好,模型的基阶阻尼也在合理范围之内,从而满足了动力相似的要求。

2 风洞模型试验及流场模拟

2.1 流场模拟

除气弹模型满足相似关系之外,在风洞内模拟实际大气边界层流场是保证试验结果正确的另一重要方面。流场模拟所考虑的相似性指标为:平均风速剖面、紊流强度剖面和紊流风谱等。

大气边界层模拟装置由尖塔、粗糙元和锯齿板组成,该装置可在较短距离内加速形成平均风速剖面及紊流强度(I_u)剖面,并可模拟不同地表粗糙度类别的大气边界层流场。

图 1 和图 2 分别为模型所在位置的平均风速剖面及紊流强度剖面,图 1 的理论曲线为相应于 I 类地表粗糙度类别的值。图 1 试验曲线与理论曲线相比较表明,该试验段模拟风场的平均风速剖面与理论要求曲线吻合良好。而由图 2 试验紊流强度剖面得,模型桥面高度处紊流强度为 $I_u = 12.2\%$,满足要求^[1]。

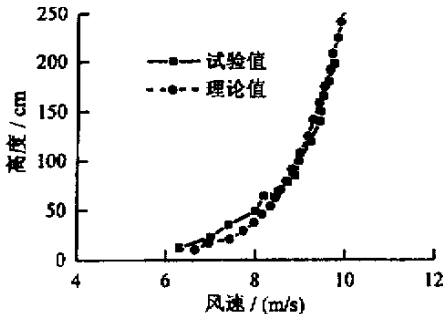


图 1 平均风速剖面

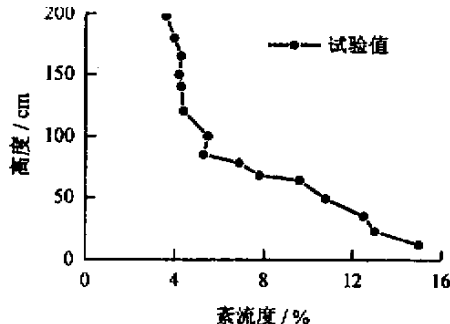


图 2 紊流强度剖面

2.2 均匀流场 6 分力试验

为了测定模型所受的静风空气力系数,从而为实桥静风内力计算提供依据,并考查结构的抗风稳定性及涡激振动特性,首先进行均匀流场中的试验。试验在 XNJD-1 风洞的第一试验段中进行。

试验时用 6 分量天平测量前后两幅上部结构模型墩底所受的静风力(前梁指迎风侧梁,后梁指背风侧梁),并由下式分别计算两幅上部结构墩底处的风力系数 C_i 和力矩系数 C_{Mi}

$$C_i = \frac{F_i}{\frac{1}{2} \rho V^2 LH} \quad (i = x, y, z) \qquad C_{Mi} = \frac{M_i}{\frac{1}{2} \rho V^2 LH^2} \quad (i = x, y, z)$$

其中: F_i 为风力; M_i 为力矩; L 为主梁全长; H 为墩顶处主梁高度; V 为风速; $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 为空气密度。对于模型: $L = 3.125 \text{ m}$, $H = 0.175 \text{ m}$;对于实桥: $L = 187.5 \text{ m}$, $H = 10.5 \text{ m}$ 。 x 轴向为横桥向, z 轴向为桥纵向, y 为竖向。

定义来流风与 x 轴夹角为水平偏角 β 。为研究不同来流风向对结构的影响,试验时取来流水平偏角分别为 $\beta = 0^\circ$ (横桥向风), 15° , 30° 和 45° 等 4 个。每个偏角均用两个试验风速进行试验。试验表明,风速不同对 6 分力系数影响很小,也即雷诺数的影响很小。表 1 列出了试验所得前后两幅上部结构墩底处的风力系数 C_i 和力矩系数 C_{Mi} 随角 β 的变化。从表 1 可见,前梁的横桥向阻力系数 C_x 、力矩系数 C_{Mx} 和升力系数 C_y 均较后梁的大。尤其是当 $\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 15^\circ$ 时前梁的横桥向阻力系数 C_x 和力矩系数 C_{Mx} 均远大于相应的后梁的值,且前后梁的这两系数还反号,这表明,两个并列的相距很近的悬臂梁,由于下缘的绕流,使两箱梁之间的区域出现了比单个箱梁的背风面更低的负压。而升力系数前后梁对于不同的方向角 β 均反号。随着风向角 β 的增大,前梁的横桥向阻力系数和力矩系数均减少,升力系数则变化小,后梁的横桥向阻力系数和力矩系数有增大的趋势,升力系数始终为负,前、后梁的顺桥向阻力系数和力矩系数基本呈现出增大的趋势。由此可见,对于相距较近的两变截面箱梁,在横桥向风作用下箱梁四周存在着较复杂的三维流动,这种三维流动严重影响了风对桥梁的作用,对于这类桥梁如仅按二维方法确定气动力参数或不考虑两幅上部结构的相互作用而仅取一幅上部结构单独进行分析将会带来较大的误差。在试验风速达 6.67 m/s (相当于实桥风速为 51.7 m/s)的范围内,还考查了结构是否发生驰振及涡激振动。试验表明,在该风速以下范围内,前后上部结构均不会发生振幅发散的失稳振动,也未发生明显的涡激振动现象。

表 1 墩底的风力系数和力矩系数随 β 角的变化

β	C_x	C_y	C_z	C_{Mx}	C_{My}	C_{Mz}	
前梁	0°	1.132	0.633	0.017	0.000	0.003	-1.471
	15°	1.104	0.651	-0.016	0.145	-0.125	-1.430
	30°	0.880	0.652	-0.178	-0.304	-0.077	-1.131
	45°	0.593	0.641	-0.237	-0.420	-0.013	-0.728
后梁	0°	-0.068	-0.220	0.004	-0.042	0.000	0.116
	15°	-0.050	-0.150	-0.131	0.073	-0.097	0.106
	30°	0.126	-0.026	-0.242	0.053	-0.195	-0.123
	45°	0.247	-0.030	-0.326	-0.218	-0.289	-0.296

2.3 紊流场中的试验

紊流场中的试验主要用于考察结构的抖振响应。试验在安装有前述边界层模拟装置的第一试验段中进行。为考察不同风向的影响,试验对来流设置了 3 个水平偏角,即: $\beta = 0^\circ$ (横桥向风), $\beta = 15^\circ$ 和 $\beta = 30^\circ$ 。

桥面高度处试验风速为 $1.292 \sim 6.630 \text{ m/s}$,按照风速比,相当于实桥桥面风速为 $10.0 \sim 51.3 \text{ m/s}$ 。

根据该桥在双悬臂状态的振型特点,最大振幅发生在悬臂端,因而选择悬臂端作为测量断面。所测信号分别为前、后梁悬臂端横、竖向位移和横、竖向加速度响应,使用 8 个通道采集。测振系统包括伸臂式位移计、加速度传感器、电涡流位移传感器、动态电阻应变仪及随机信号与振动分析系统。试验风速由热线风速仪测定,在模型前方桥面高度处还安放有一个热丝探头,用以测量各工况下桥面处的试验风速。

试验时考虑了采用将两梁横向相连的制振方案,在每个来流水平偏角下,按以下 2 种工况进行测试:工况(1)两幅梁间不设横向连系;工况(2)在 $2/3$ 悬臂长度处将两梁用薄铝片横向相连。

表 2 列出了设置与不设置横向连系主梁的横向响应在不同水平偏角时的值(已换算为实桥的值)。

表 2 设置横向连系前后主梁的横向响应(实桥风速 $v = 48.4 \text{ m/s}$)

来流偏角	位置	均方根位移/mm			均方根加速度/(m/s^2)		
		未设连系	设置连系	抑振效率/%	未设连系	设置连系	抑振效率/%
$\beta = 0^\circ$	前梁	50.8	23.0	55	0.182	0.144	21
	后梁	33.9	22.5	34	0.188	0.134	29
$\beta = 15^\circ$	前梁	47.3	21.3	55	0.187	0.129	31
	后梁	34.2	21.2	38	0.182	0.122	33
$\beta = 30^\circ$	前梁	44.4	16.1	64	0.176	0.100	43
	后梁	27.1	15.5	43	0.147	0.092	37

注 表中抑振效率定义为 $\eta = 1 - \text{设置连系的值}/\text{未设连系的值}$

试验表明,当前后箱梁没相连时,前梁和后梁的风致横向位移响应均较竖向位移响应要大得多,风致横向、竖向加速度响应则差别不大,这说明,此时结构的横向振动是主要的。对于横向位移响应,前梁的响应均较后梁的大,而对于竖向位移响应,当 $\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 15^\circ$ 时,后梁的则较前梁的大。将两幅梁横向相连均能有效地减小结构的风致横向位移和横向加速度响应,其原因在于,当前后梁之间未加横向连系时,两梁在各自所受随机气动力以及由于一个梁体运动对另一梁体所施加的附加气动力作用下,两梁的运动呈现为不同步,两梁分别在不同时刻达到最大响应。当两梁之间设置横向连系时,尽管该连系较弱,但足以使两梁产生协调一致的横向运动,而此时作用于两梁的随机气动力不相同亦不同步。此时,两梁所受气动力的差异有助于抑制横向运动,从而导致各梁的横向响应明显低于未加横向连系时的情况。

3 实桥风致内力的计算

结构的风载内力由两部分组成:风致振动引起和静风荷载引起的内力。对于前一部分内力,可用气弹模型试验所获得的位移换算至实桥,再利用有限元法反演求得。对于后一部分内力,根据表 1 所列的风力系数和力矩系数,计算出墩底的 6 个静力分量再通过有限元法分析求得双壁墩各自的墩底内力。由表 1 可见,前梁的风载静风响应明显大于后梁的静风响应,因而本文仅计算前梁

表 3 单墩底的风致内力响应($v = 48.4 \text{ m/s}$)

来流偏角	工况	单柱墩底		
		轴力/kN	横向弯矩/kN·m	纵向弯矩/kN·m
$\beta = 0^\circ$	(1)	1 919	79 169	1 403
	(2)	2 087	51 271	1 588
$\beta = 15^\circ$	(1)	2 760	85 066	1 763
	(2)	3 270	53 482	2 247
$\beta = 30^\circ$	(1)	2 777	67 469	2 243
	(2)	3 621	39 543	3 181

的风致内力响应,表 3 给出了设置与没设置横向连系时单墩底在设计风速时的主要风致内力。计算时抖振响应的峰值因子取 $g = 3.5$ 。从表 3 中可见,水平偏角为 $\beta = 15^\circ$ 时墩底的横向弯矩最大,因而为最不利风向角。两梁间设置横向连系,大大地减少了墩底的横向弯矩,虽然其轴力和纵向弯矩略有增加,但总体来说,在主梁 2/3 悬臂长度处设置横向连系是良好而又简便的抑振技术措施。

4 结束语

通过对某双幅上部结构刚构桥气弹模型风洞试验及计算结果的分析,可得出如下结论:

- (1) 在各种工况下,在设计风速范围内,结构不会发生振幅发散的失稳振动。
- (2) 在该桥施工设计风速范围内,结构不会发生明显的涡激振动。
- (3) 在施工时将两幅梁相连能十分有效地减小悬臂端的风致横向振动响应,由于该桥的横向振动响应较竖向振动响应大得多,因而减小横向振动响应能大大提高该桥的施工抗风安全度。

参考文献:

[1] 《公路桥梁抗风设计指南》编写组.公路桥梁抗风设计指南[M].北京:人民交通出版社,1996:11~14.
[2] 埃米尔·希缪·罗伯特·H.斯坎伦著,刘尚培译.风对结构的作用——风工程导论[M].上海:同济大学出版社,1992:191.