

文章编号:1673-2049(2005)04-0032-08

中国西部地区桥梁风工程研究

刘建新,李加武

(长安大学 风洞实验室,陕西 西安 710064)

摘要:中国西部地区包括新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西、西藏、云南、贵州、四川、重庆、广西及内蒙古12个省、市、自治区,面积达 $672 \times 10^4 \text{ km}^2$,占中国国土总面积的65%左右;西部地区山地面积约 $400 \times 10^4 \text{ km}^2$,占中国山地总面积 $624 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的65%左右。西部地区山峦重叠、沟壑纵横、沟深谷幽、戈壁大漠的地形地貌使西部地区的风环境和桥梁结构具有和中国东部、中部地区显著不同的特点。就西部地区风环境和桥梁结构的特点,论述了西部地区桥梁风工程应予以研究的内容和问题,并介绍了相关的风环境观测和风洞试验研究。

关键词:中国西部地区;风环境;桥梁工程;抗风设计;风洞试验

中图分类号:U442.5 **文献标志码:**A

Study of wind project of bridge in western area of China

LIU Jian-xin, LI Jia-wu

(Wind Tunnel Laboratory, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: There are 12 provinces, cities and autonomous regions in the western area of China, including Xinjiang Uygur Autonomous Region, Qinghai Province, Gansu Province, Ningxia Hui Autonomous Region, Shaanxi Province, Tibet Autonomous Region, Yunnan Province, Guizhou Province, Sichuan Province, Chongqing, Guangxi Zhuang Autonomous Region, and Inner Mongolia Autonomous Region. The total area amounts to 6.72 million square kilometers, accounting for about 65% of the national area. The mountainous region area is approximately 4 million square kilometers in the western area, accounting for about 65% of the total mountainous region area in China. In western area, the wind environment and bridge structure are different from those in other areas of China because of the large amount of overlapping mountains, deep ditches and great deserts. Authors discussed the research content of wind project aimed at the wind environment and bridge structure in western area, and also introduced the related wind environment measurement on-site and the wind tunnel tests.

Key words: western area of China; wind environment; bridge engineering; wind-resistant design; wind tunnel test

0 引言

由于中国西部地区特殊的地形地貌,造成了该地区的公共交通基础设施落后于东部、中部,这不仅

严重制约了西部地区的经济发展和社会进步,也使西部地区和东部、中部地区的差距更加扩大,同时也严重影响了中国综合国力的迅速提升。

自2001年党中央和国务院提出的西部大开发

收稿日期:2005-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50578014)

作者简介:刘建新(1942-),男,山西清徐人,长安大学教授,博士生导师. E-mail:ljx@gl.chd.edu.cn

战略决策实施以来5年间,西部地区公路交通基础设施落后的状况得到了很大的改善。据统计,截至2005年2月,西部地区通车公路里程已达 75×10^4 km,比5年前增加了 22×10^4 km;高速公路已超过8 600 km,到2005年底,有望突破 1×10^4 km。随着公路的建设,西部地区的桥梁建设也有了很大的发展,悬索桥、斜拉桥、连续刚构桥、拱桥和梁桥等各种类型的桥梁在西部均有建造。但西部地区 and 东部、中部地区相比,地形地貌有明显的不同,多崇山峻岭、山岭重丘、戈壁大漠、高原沟壑、广阔草原,而少有平原,风环境特性与东部、中部相比发生了很大变化,桥梁结构的形式和特点也因其地形地貌的特点和较少的交通流量,而不同于平原地区跨江、河和连岛工程的桥梁。因此应对西部地区桥梁风工程的特点予以明确和深入的研究。

1 地形地貌特点

中国是多山国家,山地面积约 624×10^4 km²,占中国国土面积的65%。西部12个省、市、自治区山地面积约 400×10^4 km²,又占中国山地面积的65%左右。这里云集了喜马拉雅山、横断山、秦巴山、祁连山、昆仑山、天山山脉等中国主要的山脉和黄土、云贵、内蒙古、青藏4大高原(图1)。未来几年中国西部公路及高等级公路建设主要涉及的区域是以西安、兰州、西宁一线以北的西北高原地带和以四川盆地为中心的西南山地区域。这些地区地形地貌的特点是山峦重叠、沟壑纵横、沟深谷幽。

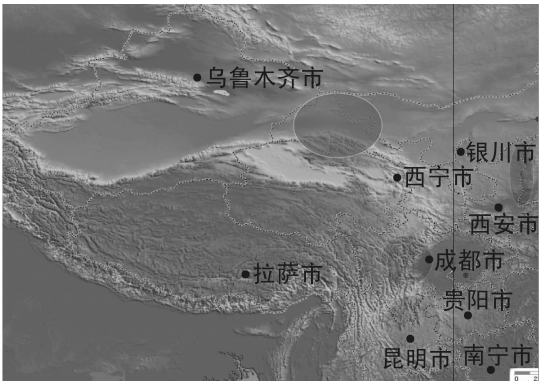


图1 中国西部地区地形地势及大风区
Fig.1 Terrain and gale area in western area of China

2 风场特性及研究现状

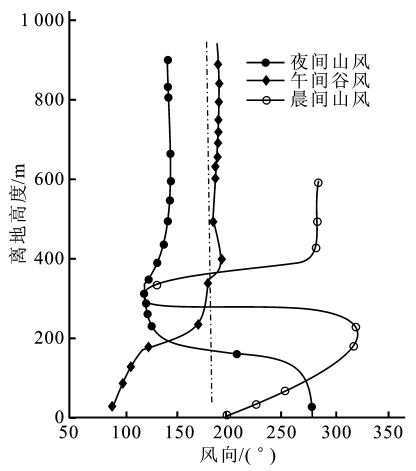
2.1 风场特性

结构风工程关注的大气边界层风特性包括:
①平均风特性,如平均风速、风向分布、极大风速

等;②风的紊流脉动特性,如紊流度、紊流的积分长度和阵风因子等;③功率谱密度函数;④山区风的攻角与风剖面幂指数系数 α 等。

2.1.1 风速风向

中国西部崇山峻岭,河谷幽深,山谷风盛行。复杂的地形对风速影响极大,风向、风速时空差异明显,既带有明显的季风环流基本规律,又带有明显的区域特征。地形对风速、风向的影响主要有:①狭管效应的影响,当气流通过山口峡谷时,流线加密,风速增大,如四川的下关位于山口处,成为有名的“风城”,年均8级(17 m/s)以上的大风天气超过全年天气的三分之一,而康定、甘孜、丹巴一年有100 d以上出现大风天气;②山谷风效应,高山和河谷、盆地间容易形成山谷风,谷底风向与河谷走向一致;③海拔高度及高空急流的影响,高山及高海拔地区受大气环流影响明显,容易形成持久的大风,风向服从大气环流的基本规律,如1981年2月19~24日,青海高原出现了持续5 d的10级以上大风天气。西部地区大风区域(图1)有川西与滇北高原、元江河谷、滇东北、黔西、河西走廊以及新疆的北疆、陕北、广西沿海地区。其中除广西沿海地区大风区明显受季风影响外,其他区域的大风均受到地形影响。



如图2所示,山区风向受地形影响非常明显,从谷底至山顶风向变化较大,山谷谷底的强风向与山谷走向一致;峰顶附近的风向与大气环流形成的风向基本一致,受地形影响小。

2.1.2 气流攻角

气流的攻角对桥梁结构断面的三分力系数、颤振临界风速、涡激共振发振风速及涡振幅影响较大。平原地区的气流攻角较小,风洞试验采用的攻角多为 $\pm 5^\circ$ 。但山区风场因受山谷风或焚风效应的影响,其攻角大于平原地区的。长安大学风洞实验室的研究人员,在黄河禹门口附近测得风速为15 m/s时的攻角超过 6° ,当风速很小时攻角甚至会

达到 30°。山区气流正攻角受上升气流影响大,如山脉的向风侧或幽深的河谷;山区气流负攻角受下降气流的影响大,尤其是背风侧,为焚风效应多发地区。当山谷风、焚风盛行或附近有较大孤立山坡影响时,平原地区的气流攻角的取值对山区的气流攻角取值没有参考价值,山区气流的攻角应以实测数据为主。

2.1.3 风剖面

地势平坦地区,因大气边界层作用,离地面越高,风速越大,达到一定高度后,风速基本不变,其风速轮廓线如图 3 所示,图 3 中 U 为风速, δ 为大气边界层厚度, z_0 、 z_{01} 为粗糙度, z_g 、 z_{g1} 为参考点高度。

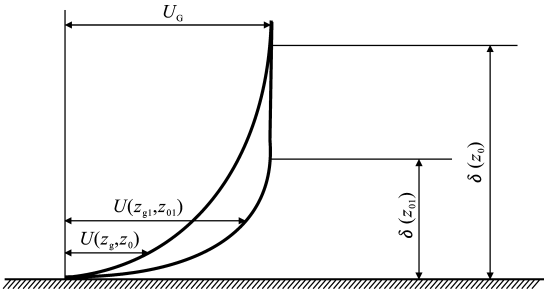


图 3 平坦地区的风速轮廓线
Fig. 3 Mean wind speed profile of open terrain

山区风剖面的形状,尤其是山谷的风速轮廓线形状比平原地区要复杂的多。其原因是:①山区风剖面零风速位置确定困难,理论上说,贴地层风速为零,但山区地表起伏较大,边界层厚度沿水平方向伸展,不同位置处得到的同一高程的风速不同;②山区的粗糙度系数确定困难,现行的建筑荷载规范,以及桥梁抗风设计

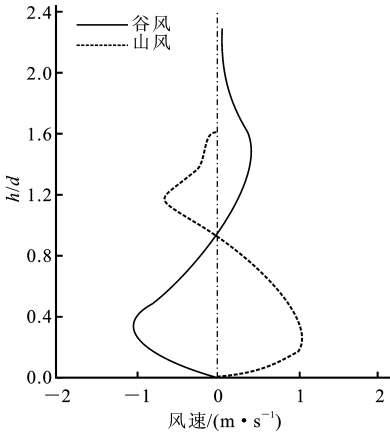


图 4 山谷风速风剖面
Fig. 4 Wind speed profile in valley

规范中的 4 类地表没有包括山区,因而导致推算山区桥梁的设计风速困难;③山地的风剖面复杂,并非均遵守幂指数规律,如图 4 所示(h 为测点高度; d 为谷深),风速并非随高度由下而上呈幂指数增加。对山西禹门口黄河大桥的风观测表明:受地形影响,在高度为 45 m 位置的风速比 20 m 位置的风速小,如表 1 所示,不服从幂指数规律。因此,山区的风剖

面分布规律尚需深入研究。

2.1.4 紊流度与阵风因子

紊流度反映了风的脉动强度,是确定结构脉动风荷载的关键参数,风的脉动强度也可用阵风因子表示,阵风持续期越长,阵风因子越小。研究表明:平原地区的紊流度与阵风因子在强风时小,低风速时大;气候变化时大,稳定期间小。但山地风场因受上游山峰或植被的影响,紊流参数中含有大量受特征尾流影响的参数。不同的地形地貌对紊流特性有着不可忽视的影响。

表 1 山西禹门口黄河大桥桥位处 10 min 平均最大风速
Tab. 1 Average maximum 10 minutes speeds at Yumenkou Yellow River Bridge location in Shanxi

高度/m	风速/(m·s ⁻¹)	
	2005-05-30	2005-08-12
10	14.98	13.51
20	18.3	14.46
30	17.17	17.05
40	16.47	17.16

2.2 黄河禹门口地区风特性观测研究^[2]

禹门口黄河大桥是横跨黄河,连接秦、晋两省的一座特大型桥梁,全长约 6 km。主桥位于黄河河槽中部,是跨径为 174+352+174 m 一联的双塔斜拉桥;在河槽两侧分别设置了跨径为 75+2×125+75 m 一联的矮塔斜拉桥;其余的河槽及两岸的引桥采用 30、50 m 的预应力混凝土 T 型梁。

禹门口黄河大桥位于该地区风口的下游(图 5),历史上经常受到大风的袭击;而陕西韩城和山西河津气象站又离该桥址较远,无法提供直接的风特

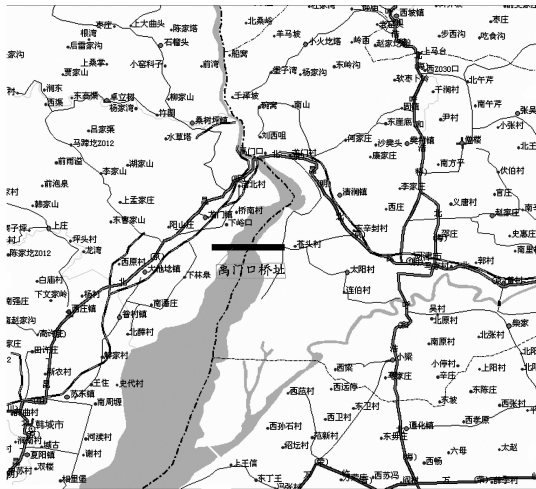


图 5 禹门口黄河大桥桥位
Fig. 5 Location of Yumenkou Yellow River Bridge
性参数。受山西省交通厅的委托,长安大学风洞实

验室的研究人员在禹门口大桥的桥址处建立了一座高 60 m(图 6)和两座高 30 m 的风观测站(图 7),安装了 8 台风速观测仪进行实时观测。

3 不同桥型的抗风设计特点

3.1 悬索桥

和跨江、河和连岛工程的悬索桥相比,西部地区和靠近西部的鄂西、湘西山区的悬索桥大都跨越深山峡谷,跨度都较大。如鄂西的四渡河桥、湘西的矮寨桥和贵州的坝陵河桥,跨度均达到 1 000 m 左右,包括在西部地区已建成的悬索桥,如重庆忠县长江大桥

和万州长江二桥,这些桥由于受到交通运输条件和加劲梁施工条件的限制,均采用桁架加劲梁,加劲梁的施工方法采用或计划采用缆索吊装法。当桥梁的跨度较大且单个吊装单元的质量较大时,缆索吊装系统的设计变得繁杂,且造价不菲。因此当桥梁的上部结构由箱梁变为桁梁时,施工方法也应有所变化。如表 2 中所示的相关资料,在收集到的 35 个悬索桥的桥例中,采用箱梁加劲梁的有 18 座;采用桁架加劲梁的有 17 座,而其中桁架加劲梁悬索桥的加劲梁施工方法采用悬臂拼装法的又有 9 座(不计乔治·华盛顿桥),占桁架加劲梁悬索桥的 53%^[3]。

表 2 悬索桥的加劲梁及施工架设方法

Tab. 2 Stiffening girder of suspension bridges and construction erecting methods						
序号	桥名	国家	年份	跨度/m	加劲梁类型	加劲梁架设方法
1	关门大桥	日本	1973	712	钢桁架	悬臂拼装
2	因岛大桥	日本	1983	770	钢桁架	悬臂拼装
3	大鸣门桥	日本	1985	876	钢桁架	悬臂拼装
4	南备赞瀬户大桥	日本	1988	1 100	钢桁架	浮吊架设+悬臂拼装
5	北备赞瀬户大桥	日本	1988	990	钢桁架	浮吊架设+悬臂拼装
6	下津井瀬户大桥	日本	1988	940	钢桁架	浮吊架设+悬臂拼装
7	大岛大桥	日本	1988	560	钢箱梁	浮吊架设+缆载吊机垂直起吊
8	明石海峡大桥	日本	1998	1 991	钢桁架	浮吊架设+悬臂拼装
9	白鸟大桥	日本	1998	720	钢箱梁	浮吊架设+缆载吊机垂直起吊
10	来岛三桥	日本	1999	1 030	钢箱梁	浮吊架设+缆载吊机垂直起吊
11	来岛二桥	日本	1999	1 020	钢箱梁	浮吊架设+缆载吊机垂直起吊
12	来岛一桥	日本	1999	600	钢箱梁	浮吊架设+缆载吊机垂直起吊
13	安云滩大桥	日本	2000	750	钢箱梁	缆载吊机垂直起吊
14	汕头海湾大桥	中国	1995	452	混凝土箱梁	缆载吊机垂直起吊
15	西陵长江大桥	中国	1996	900	钢箱梁	缆载吊机垂直起吊
16	虎门大桥	中国	1997	888	钢箱梁	缆载吊机垂直起吊
17	青马大桥	中国	1997	1 377	钢箱梁	缆载吊机垂直起吊
18	丰都长江大桥	中国	1997	450	钢桁架	缆载吊机垂直起吊
19	江阴大桥	中国	1999	1 385	钢箱梁	缆载吊机垂直起吊
20	海沧大桥	中国	2000	648	钢箱梁	缆载吊机垂直起吊
21	忠县长江大桥	中国	2001	560	钢桁梁	缆索起吊
22	宜昌大桥	中国	2001	960	钢箱梁	缆载吊机垂直起吊
23	万州长江二桥	中国	2004	580	钢桁梁	缆索起吊
24	润扬大桥	中国	2004	1 490	钢箱梁	缆载吊机垂直起吊
25	乔治·华盛顿桥	美国	1931	1 067	钢桁架	上层悬臂拼装,下层缆载吊机垂直起吊
26	奥克兰海湾桥	美国	1936	704	钢桁架	缆载吊机垂直起吊
27	金门大桥	美国	1937	1 280	钢桁架	悬臂拼装
28	麦金奈克桥	美国	1957	1 158	钢桁架	缆载吊机垂直起吊
29	维拉扎诺桥	美国	1964	1 298	钢桁架	缆载吊机垂直起吊
30	福斯公路桥	英国	1964	1 006	钢桁架	悬臂拼装
31	塞文桥	英国	1966	987	钢箱梁	缆载吊机垂直起吊
32	恒伯尔桥	英国	1981	1 410	钢箱梁	缆载吊机垂直起吊
33	4 月 25 日桥	葡萄牙	1966	1 013	钢桁架	缆载吊机垂直起吊
34	波斯普鲁斯二桥	土耳其	1988	1 090	钢箱梁	缆载吊机垂直起吊
35	大海带桥	丹麦	1996	1 624	钢箱梁	缆载吊机垂直起吊

采用悬臂拼装法施工悬索桥加劲梁时可以不利用梁段垂直起吊的缆载吊机,也不用建立较为复杂的缆索吊装系统,其施工方法和工程常用的斜拉桥、梁桥的悬臂拼装法基本一致,但用悬臂拼装法施工架设桁架加劲梁的悬索桥时,由于要在已拼成的呈悬臂状态的桥面上运输桁架加劲梁构件,就要求将已拼装的梁段逐次刚结,这和垂直起吊法是根本不同的。逐次刚结法可能使吊杆的应力在加劲梁的吊装阶段超过成桥状态,同时主缆的线形控制也不同于垂直起吊法。和垂直起吊法相同,当加劲梁吊装拼装率不同时,施工架设阶段悬索桥的空气动力稳定性是不同的。西部地区悬索桥的加劲梁采用桁架结构时,应结合施工架设控制和抗风对其悬臂拼装的施工架设方法进行研究。

3.2 拱桥

3.2.1 形式

拱桥是跨越西部地区 V 型山谷的优选桥型之一。主跨为 420 m 的重庆万县长江大桥是劲性骨架的钢筋混凝土拱桥,主跨为 460 m 的重庆巫山长江大桥是钢管混凝土拱桥,这两座桥跨度均为同类桥型的世界第一。

拱桥由拱肋、桥面结构和连接两者的构件组成,因此根

据桥面和拱肋的相对位置、拱肋和梁的相对刚度、拱肋的类型、拱上建筑的类型、拱的结构形式和材料、拱桥的施工方法,拱桥可分为多种形式。抗风设计时考虑的重点应根据拱桥形式的不同而有所变化。

3.2.2 抗风设计

(1) 拱桥的静力抗风设计^[1]

拱桥主要是由拱肋的轴力抵抗面内荷载的构造物,刚度比同跨度的梁桥大,因此在拱桥设计时,一般仅进行静风设计,可参考《公路桥梁抗风设计规范》(JTJ/T D60-01-2004)(后文简称《抗风规范》)的相关条文。

(2) 拱桥的动力抗风设计

拱桥虽然刚度较大,但考虑其面内振动时和梁

桥不同,作为低阶振型出现的是反对称振型,而且对应这种反对称振型时拱的刚度并不很大,因此设计大跨度拱桥时也应注意动力抗风设计。风引起的拱振动,可以分为作用在拱肋和作用在梁的空气力振动;振型以及拱肋与梁相对位置对拱振动的影响有相当强的空间效应,常常必须依靠风洞试验进行评价。

(3) 施工阶段的抗风稳定和吊杆的抗风设计

西部地区拱桥多建于风环境恶劣的山谷地区。在这些地区,交通不便,施工条件差,常采用缆索起吊或斜吊索悬出的施工方法。合拢之前的拱桥体系和成桥相比,刚度显然很小,尤其是横向刚度更小,因此应对施工架设中拱桥的抗风稳定性进行充分的研究。

除了拱桥的整体稳定问题之外,拱桥中问题突出的还有下承式拱桥吊杆的振动。吊杆是以轴向受拉设计的,因此多采用弯曲刚度小的钢管或 H 型钢,易产生低风速下的涡激共振。各国都曾有采取措施控制拱桥吊杆风振的实例。

3.2.3 相关的风洞试验

(1) 生米大桥概况^[4]

生米大桥(图 8)位于南昌市外环快速路上,是跨越赣江连接昌南、昌北城的重要桥梁。生米大桥主桥上部结构采用两孔钢管混凝土系杆拱,全长为 606 m,其中两主跨为跨径 228 m 的连拱,两侧边拱跨径均为 75 m,结构属于刚性拱柔性系杆结构。主拱桥面以上为钢管混凝土拱,主跨钢管混凝土拱肋断面采用 4 根 $\Phi 900$ 钢管组成空间桁架结构,主孔拱肋高为 4.6 m,拱肋宽为 2.6 m。主拱肋由龙门架吊装施工,边拱用满堂支架施工。主桥拱顶高度近 55 m(相对常水位),桥面高度近 22 m(相对常水位),龙门架相对于常水位高度达 58 m。桥址处江面开阔,地表粗糙度小,阵风较大。

(2) 生米大桥风洞试验目的和内容

大跨度拱桥抗风稳定性与风荷载作用下的失稳



图 7 30 m 观测站

Fig. 7 30-meter-high measurement station



图 6 60 m 观测站

Fig. 6 60-meter-high measurement station

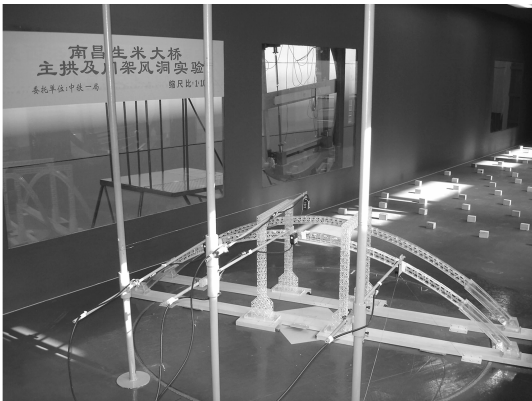


图 8 生米大桥主拱及龙门架风洞试验气弹模型

Fig. 8 Aeroelastic test models of main arch and frame of Shengmi Bridge

形态有关,根据静风荷载和动风荷载的不同作用特点,大跨度拱桥的抗风稳定性一般分为静力稳定性和动力稳定性。拱桥结构在流动的气流中不断吸收能量,当该能量大于结构阻尼所耗散的能量时,就会产生发散性的自激振动——颤振或驰振;当气流流经结构断面时,周期性交替脱落的涡旋将引起另一种桥梁共振现象——涡激振动,可能造成结构强度破坏和疲劳破坏,并严重影响结构使用性能。为提高施工期间龙门架的抗风性能,确保施工期间裸拱的抗风安全,在生米大桥施工期间抗风安全的风洞试验中,对龙门架和裸拱均进行了安全试验,具体内容:①风洞试验,包括龙门架抗风安全气弹模型风洞试验;裸拱抗风安全风洞试验,包括即将合拢的裸拱稳定性及响应分析和合拢后裸拱的稳定性及响应分析。②数值分析,包括裸拱拱肋的三分力数值计算;静风稳定性数值分析。

(3)生米大桥风洞试验结果

生米大桥风洞试验结果包括:①全桥气弹模型试验结果。当桥位处 10 m 高度的风速达到 80 m/s 时,龙门架未出现颤振或驰振失稳现象;当桥位处 10 m 高度的风速达到 100 m/s 时,主拱肋未出现颤振或驰振失稳现象。试验过程中,龙门架和主拱肋均未出现显著的涡激共振。②静力稳定性研究结果。在垂直于龙门架平面的风荷载作用下,龙门架空载状态的最大面内侧向位移随着风速增大而增大,当桥位处 10 m 高度的风速达到 73.5 m/s 时,最大面外侧向位移为 0.182 m;在垂直于龙门架平面的风荷载作用下,龙门架负载状态的最大面外侧向位移随着风速增大而增大,当桥位处 10 m 高度的风速达到 60 m/s 时,最大面内侧向位移为 0.126 m。在风荷载标准值作用下,主拱肋最大悬

臂状态时的最大横桥向位移为 0.58 m,单片拱肋合拢状态时的最大横桥向位移为 0.23 m。

3.3 高墩大跨连续刚构桥

西部地区的云南、贵州、广西、陕西、四川、重庆等地,当公路线路穿越崇山峻岭和高原沟壑区时,高墩大跨的连续刚构桥已成为首选桥型,表 3 为陕西省境内的部分高墩大跨连续刚构桥。

表 3 陕西省境内的部分高墩大跨连续刚构桥/m

Tab. 3 Some continuous rigid frame bridges with high pier and long span in Shaanxi Province

序号	桥名	主跨	最高墩高	桥墩形式
1	淤泥河特大桥	160	105	双薄壁空心墩
2	漭达沟特大桥	148	92	单薄壁空心墩
3	葫芦河特大桥	160	138	双薄壁空心墩
4	东龚家塬特大桥	145	58	双薄壁空心墩
5	洛河特大桥	160	143.5	双薄壁空心墩
6	老庄河特大桥	170	110	双薄壁空心墩
7	杜家河特大桥	165	85	矩形桥墩
8	金水沟特大桥	136	98	单薄壁空心墩
9	徐水沟特大桥	200	98	双薄壁空心墩
10	太枣沟特大桥	170	120.54	单薄壁空心墩

西部地区修建的高墩大跨连续刚构桥除了具有墩高、跨度大的特点之外,还常采用上、下行的分离式布置,致使桥梁断面的宽高比较小,虽然顺应了线路走向,但使弯、坡桥较多。

3.3.1 抗风设计

(1)风荷载计算

高墩大跨连续刚构桥的梁为变截面,同时常采用双幅桥,因此其上作用的风荷载除应通过风洞试验求出墩、梁上的三分力系数外,还应考虑阵风效应和双幅桥相互间的干扰效应。

根据《抗风规范》的规定,静阵风风速

$$V_g = G_V V_Z \tag{1}$$

式中: V_g 为静阵风风速/($m \cdot s^{-1}$); G_V 为静阵风系数,按《抗风规范》中表 4.2.1 取值; V_Z 为基准高度 Z 处的风速/($m \cdot s^{-1}$)。

主梁上的静阵风荷载

$$F_H = \frac{1}{2} \rho V_g^2 C_H H \tag{2}$$

式中: F_H 为作用在主梁单位长度上的静阵风荷载/($N \cdot m^{-1}$); ρ 为空气密度,取为 1.25 kg/m^3 ; C_H 为主梁阻力系数; H 为主梁的投影高度/m,宜计入栏杆或防撞护栏以及其他桥梁附属物的实体高度。

(2)抖振效应和抗风稳定性验算

高墩大跨连续刚构桥的刚度较小,固有周期较

大,基频较小,如洛河特大桥的基频为 0.283 Hz,老庄河特大桥的基频为 0.341 Hz,徐水沟特大桥的基频为 0.457 Hz。当风作用于桥梁上诱发抖振效应时,应考虑由于桥梁结构抖振引起的惯性分量对结构内力和位移的影响,同时应通过风洞试验检验桥梁的驰振稳定性、涡激共振响应以及双幅桥梁间的相互干扰效应,尤其是在最大双悬臂状态下。

3.3.2 洛河大桥的风洞试验^[5]

(1)洛河大桥概况

洛河大桥是西部大通道包(头)北(海)线陕西境内黄陵至延安高速公路上的一座特大型桥梁,主桥为 $90+3\times 160+90$ m 上、下行车道分离的预应力混凝土连续刚构,引桥分别是:黄陵侧为 10×30 m 的预应力混凝土连续箱梁,延安侧为 3×30 m 的预应力混凝土连续箱梁。单幅桥梁主梁形式为单箱单室混凝土箱梁,箱梁根部高度为 9.0 m,跨中高度为 3.5 m。主桥桥墩采用双薄壁空心桥墩,横桥向宽为 6.5 m,顺桥向单薄壁壁厚为 4.0 m 及 3.0 m,最大墩高为 143.5 m。

(2)洛河大桥风洞试验目的和内容

由于洛河大桥地处强风地区,风荷载是其主要荷载,又由于洛河大桥为上、下行车道分离的双幅桥梁,因此需考虑气流的遮挡和干扰,并进行施工状态的风洞试验。这些试验包括:①测压风洞试验(图 9)。测压风洞试验模型采用 1:150 的几何缩尺比,并采用有机玻璃制作,考虑补偿模型的影响,试验中将测压模型和补偿模型一起放置在转盘上,通过旋转转盘模拟不同风向。另外,试验中采用了 3 种施工状态模型,即独立墩施工状态、半悬臂施工状态和最长悬臂施工状态模型,每种模型均测试了上、下游 $-50^\circ\sim 50^\circ$ (风向角间隔取为 10°)共 22 个风向角下的压力分布。试验测量了这 3 种施工状态下共计 548 个测压孔的静风压力。②静力三分力系数测力风洞试验。测力风洞试验模型采用 1:50 的缩尺比,由测量模型、补偿模型和辅助模型共同组成。模型全长为 1.46 m,试验中将主梁的单悬臂最大长度等分为 5 段,每段长度为 0.292 m,试验采用立式底支方式测量,通过 β 角转盘的角度变换,即可得到主梁的不同攻角,攻角 α 的范围为 $-8^\circ\sim 8^\circ$,间隔为 1° ,分别测出迎、背风侧每一段上的平均空气静力系数。③测振风洞试验。本试验中选用 1:100 几何缩尺比的气弹模型,它与实桥之间除了满足几何外形相似外,还应满足相关的无量纲参数的一致性条件。模型由变截面矩形钢芯梁骨架和有机玻璃外

衣及配重铜块组成,桥墩由等截面的矩形钢棒、有机玻璃外衣组成,通过钢板固定于风洞地板上。主要进行的各项试验为:均匀流场及紊流场下的驰振稳定性检验;均匀流场下,不同风偏角时的主梁悬臂端竖向及水平静风位移响应测

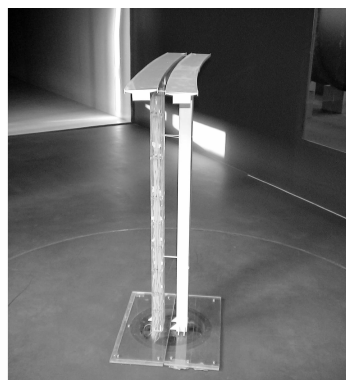


图 9 测压风洞试验模型

Fig. 9 Test model of wind tunnel used to measure surface pressure

量;紊流场下,不同风偏角时的主梁悬臂端竖向及水平抖振位移响应测量。

(3)洛河大桥风洞试验结果

测压风洞试验得到洛河大桥全部测压点在 22 个风向角下对应的风压系数,以及对应于 10 min 平均最大风速下的 30、50、100 年重现期的平均风压值、风压的均方根值及最大、最小风压值。

由并列主梁分段测试的空气静力三分力试验得到:迎风侧主梁的侧向力系数远远大于背风侧主梁,其值随主梁截面宽高比减小而增大,变化范围为 1.15~1.35;迎风侧主梁的竖向力系数在 0.30~0.49 之间,也远大于背风侧主梁,且两者竖向力方向相反,这体现了间距很小的并列单箱梁空气静力特性的特点。

当风向偏角为 0° 左右时,主梁在最长双悬臂施工状态下将产生最大的抖振位移;当 $V=45$ m/s 时,竖向和水平位移分别为 31、189 mm。

本试验中给出了考虑静风荷载和抖振惯性力共同作用下所产生的墩底和主梁根部的最大内力,该内力可与地震、活载、温度等作用下的内力进行比较组合。

4 结 语

中国进行山地气候尤其是西部地区山地气候研究开展较早,建国初期,中央气象局、南京大学等单位结合三峡工程研究了三峡水库对区域气候的影响;20 世纪 70 年代中国老一辈气象学家结合青藏铁路计划,对横断山脉、秦巴山、昆仑山、黄土高原等西部地区山地的气候进行了大规模研究,取得了一些成果。但这些结果主要集中于地形对气候的影响,而桥梁工程师所关心的风场特性参数研究的成

果相对较少;同时因设备所限,无法得到更为详尽、实时的参数。

目前进行西部山地风场特性及其对公路桥梁影响的研究项目刚刚起步。长安大学的研究人员结合山西禹门口黄河大桥项目,开展了对陕西韩城、山西河津地区黄河出山口风环境的观测研究,并正进行地形数值模拟。湖北省交通厅结合沪蓉高速公路建设,对该线上一个典型河谷进行了风场观测。这些研究因直接从桥梁抗风安全出发,因此研究更有针对性,数据可用性更强。但靠现有少数的观测点进行西部地区复杂的地形风场特性研究是很困难的。

自20世纪90年代以来,短短十几年间,中国的桥梁建设已迈入世界桥梁建设大国行列;21世纪以来,中国西部桥梁建设也达到了空前未有的水平。但中国地域辽阔,地形地貌复杂多变,社会经济发展水平在各地也有相当大的差异,桥梁建设还存在许多问题有待解决。近年来,随着西部地区经济的发展,公路及高等级公路建设也随之蓬勃发展。出于地形等考虑,这里修建的多是一些高墩大跨桥梁,风

工程问题也日渐突出,因此研究西部山地风环境特点及其对公路桥梁的影响迫在眉睫。笔者仅结合长安大学风洞实验室建成一年来的工作,就西部地区桥梁的风工程问题谈了一些粗浅的看法,难免有缺失之处。笔者建议在西部公路建设中,以高等级公路、大跨桥梁建设为依托,开展更多地点的风环境特点和桥梁风工程研究。

参考文献:

- [1] JTJ/T D60-01-2004,公路桥梁抗风设计规范[S].
- [2] 长安大学风洞实验室.禹门口黄河大桥风特性观测与风环境数值模拟分析计算[R].西安:长安大学风洞实验室,2005.
- [3] 川田忠树.现代吊桥[M].东京:理工图书株式会社,1987.
- [4] 长安大学风洞实验室.南昌生米大桥主拱架设抗风性能风洞试验研究报告[R].西安:长安大学风洞实验室,2005.
- [5] 长安大学风洞实验室.洛河大桥抗风性能试验研究[R].西安:长安大学风洞实验室,2005.
- [4] ZHOU Y, KAREEM A. Gust loading factor; new model[J]. J. Struct. Eng., 2001, 127(2): 168—175.
- [5] 张相庭.结构顺风向风振的规范表达式及有关问题的分析[J].建筑结构, 2004, 34(7): 33—35.
- [6] KASPERSKI M. Extreme wind load distributions for linear and nonlinear design[J]. J. Eng. Struct., 1992, 14(1): 27—34.
- [7] HOLMES J D. Effective static load distributions in wind engineering[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2002, 90(2): 91—109.
- [8] TAMURA Y, SUGANUMA S, KIKUCHI H, HIBI K. Proper orthogonal decomposition of random wind pressure field[J]. J. Fluids and Structures, 1999, 13(7): 1 069—1 095.
- [9] WILSON E L, YUAN M W, DICKENS J M. Dynamic analysis by direct superposition of RITZ vectors[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1982, 10(6): 813—821.

(上接第31页)

(2)初步提出了关于大跨度屋盖结构等效静风荷载问题的研究思路,并给出了各等效分量的确定方法,即等效背景分量可以表示为脉动风荷载本征模态的组合;共振分量可表示为各主导振型惯性力的组合。

(3)本文的部分工作还处于探索阶段,所得结论亦有待于进一步验证。

参考文献:

- [1] DAVENPORT A G. Gust loading factor[J]. J. Struct. Div., 1967, 93(3): 11—34.
- [2] SIMIU E. Equivalent static wind loads for tall buildings design[J]. J. Struct. Div., 1976, 102(4): 719—737.
- [3] SOLARI G. Alongwind response estimation: closed form solution[J]. J. Struct. Div., 1982, 108(1): 225—244.