

异形排架拱桥拱肋构件风荷载遮挡效应 风洞试验研究

侯旭¹,王学军¹,刘曜坤²,龙航^{3,4},温青^{3,4},华旭刚³

(1.中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西西安 710075;2.深圳高速建设发展有限公司,广东深圳 518110;
3.湖南大学土木工程学院,湖南长沙 410028;4.湖南科技大学土木工程学院,湖南湘潭 411201)

摘要:排架拱桥是一种新颖的结构形式,排架密集布置的空间构件对风荷载存在显著的遮挡效应。该文以拱肋构件密集布置的异形排架拱为工程背景,通过标准双方形拱肋和双矩形拱肋、带翼板双方形拱肋和双矩形拱肋节段模型风洞试验,获得了 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向角范围内中心间距对拱肋构件气动阻力和气动升力系数的影响,分析了拱肋构件风荷载遮挡效应特征。风洞试验研究表明:迎风拱肋的遮挡效应会使背风拱肋阻力系数明显减小,且中心间距比越小,背风拱肋阻力越小。随着风向角增大,迎风拱肋遮挡效应减弱,当风向角超过 30° 后,遮挡效应基本消失;翼板对背风拱肋气动阻力的影响与中心间距比和风向角相关,在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 风向角内,翼板基本不影响背风拱肋气动阻力,在 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向角内,翼板使背风拱肋气动阻力出现差异,差异大小与中心间距比相关。

关键词:排架拱桥;拱肋;遮挡效应;气动力;风洞试验

中图分类号:U448.22

文献标志码:A

Wind Tunnel Test on Shielding Effect of Arch Ribs for Irregular Bent Arch Bridges

HOU Xu¹, WANG Xuejun¹, LIU Yaokun², LONG Hang^{3,4}, WEN Qing^{3,4}, HUA Xugang³

(1. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China; 2. Shenzhen Expressway Construction and Development Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518110, China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410028, China; 4. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: Bent arch bridges are a kind of novel structural form, and the components for spatial rod structures with densely arranged components exert significant shielding effects on wind load. By taking an irregular bent arch with densely arranged arch rib components as the engineering background, wind tunnel tests of the sectional model of two square arch ribs and two rectangular arch ribs with and without flanges were conducted to obtain the influence of center distance on the aerodynamic drag and aerodynamic lift coefficient of arch ribs within the wind direction angles of $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$. Meanwhile, the characteristics of the shielding effect of arch rib components on wind load were analyzed. The results of wind tunnel tests show that the shielding effect of windward arch ribs will significantly reduce the drag coefficient of leeward arch ribs. The smaller center-to-center distance ratio leads to the smaller drag of leeward arch ribs. As the wind direction angle increases, the shielding effect of windward arch ribs is weakened, with the shielding effect basically disappearing at the wind direction angle of more than 30° . The influence of flanges on the aerodynamic drag of leeward arch ribs is related to the center-to-center distance ratio and wind direction angle. In the wind direction angle of $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$, the flanges have almost no influence on the aerodynamic drag of leeward arch ribs. In the wind direction angle of $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$, the flanges lead to difference in the aerodynamic drag of leeward arch ribs, with the difference related to the center-to-center distance ratio.

Keywords: bent arch bridge; arch rib; shielding effect; aerodynamic force; wind tunnel test

收稿日期:2024-10-23 修回日期:2025-12-29

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(编号:2021JM-606)

作者简介:侯旭,男,硕士,高级工程师.E-mail: 149847347@qq.com

0 引言

排架拱桥是一种新颖的桥梁结构体系,由排架拱和主梁组成。排架拱结构的构件布置密集、空间位置关系复杂、长细比大,风荷载是这些构件的主要外荷载之一,其取值关系结构安全,在设计时受到高度重视。

矩形或方形截面钢箱拱肋是拱桥常用的一种形式^[1-5]。与独立拱肋相比,排架拱桥密集布置的拱肋存在相互遮挡。因此,其风荷载具有显著的遮挡效应。杨风利等^[6]以输电塔结构为例,研究了双角钢杆件、双钢管杆件阻力系数的遮挡效应;牛华伟等^[7]以钢管-角钢组合输电塔杆件为例,研究了体型系数及背风面风荷载折减系数;张军锋等^[8]研究了冷却塔群塔不同布置形式对风荷载的遮挡效应;楼文娟等^[9]通过风洞试验研究了阵列光伏板体型系数遮挡效应;严亚林等^[10]以高层建筑群为例,开展了风致干扰效应风洞试验研究。除了针对专门的工程结构,针对一些普通的截面,如圆形截面、方形截面等,一些学者也开展了基础研究。刘小兵等^[11]开展了串列多圆柱气动力干扰效应的试验研究;杨群等^[12]开展了串列三圆柱绕流的时均压力分布与气动力研究;杜晓庆等^[13]通过节段模型测压风洞试验和数值风洞方法,系统研究了双方柱在不同空间布置特征下的气动力干扰和遮挡效应。微小的气动外形改变,如方形截面的倒角^[14]、圆角^[15]和切角^[16]等气动措施,会显著改变柱体的气动力特征。然而,现有关于双方柱风荷载遮挡效应的研究,主要针对尖角标准方形截面,鲜有开展带翼板方形和矩形截面的风荷载遮挡效应研究。

排架拱桥是一种新颖的桥梁结构体系,当前桥

梁抗风研究主要集中在索塔、主梁、缆索等构件^[17-21],针对排架拱桥拱肋构件的风荷载及遮挡效应的研究较少。鉴于此,本文以构件密集布置的异形排架拱肋构件为工程背景,通过空间布置两个方形拱肋和矩形拱肋节段模型风洞试验,获得了 $0\sim 90^\circ$ 风向角和4种不同中心间距比下拱肋的三分力系数,研究了标准方形和矩形拱肋、带翼板方形和矩形拱肋的风荷载遮挡效应。研究成果可为类似排架拱桥拱肋和类似截面的风荷载取值提供参考。

1 风洞试验设计

1.1 工程背景

本文研究的异形排架拱结构如图1所示。该排架拱结构独特、造型新颖,杆件数量多且布置密集,桥址处沿海强风区,构件风荷载取值是该结构设计必须解决的问题。

排架拱拱肋采用带翼板矩形钢箱梁,箱梁截面尺寸由拱脚处的 $1.4\text{ m}\times 1.0\text{ m}$,线性渐变至拱顶处的 $1.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}$,翼板突出长度为 0.04 m 。纵撑采用方形截面,截面尺寸为 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$,翼板凸出长度同样为 0.04 m 。拱肋和纵撑典型截面设计图如图2所示。

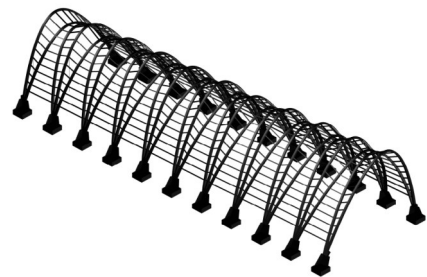


图1 排架拱结构三维图

Figure 1 3D diagram of bent arch structure

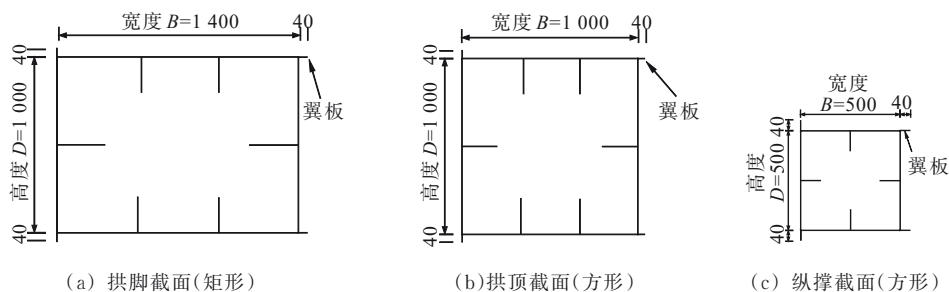


图2 拱肋和纵撑设计图(单位:mm)

Figure 2 Design of rib and longitudinal bracing (unit: mm)

1.2 遮挡效应风洞试验

根据图2所示拱肋和纵撑的截面特征,拱肋拱顶

截面和纵撑截面均为方形,拱肋拱脚截面采用高宽比为5:7的矩形,分别制作了两个方形截面节段模型

和两个高宽比5:7矩形截面节段模型。拱顶和拱脚构件的几何缩尺比为1:10,纵撑构件的几何缩尺比为1:5。因拱顶截面和纵撑截面缩尺不一样,设计了两类翼板,分别模拟拱肋的翼板和纵撑的翼板。排架拱典型箱梁模型和翼板几何尺寸如表1所示,G1构件和Y1构件组合为拱顶节段模型,G1构件和Y2构件组合为纵撑节段模型,G2构件与Y1构件组合为拱脚节段模型。将翼板按照图2所示位置粘贴于箱梁上就可得到如图2所示的拱肋和纵撑截面节段模型。

表1 箱梁和翼板模型几何尺寸

Table 1 Geometric dimensions of box girders and flange models

编号	构件	外形	长度 L/mm	高度 D/mm	宽度 B/mm	高宽比 λ
G1	箱梁	方形	2 000	100	100	1:1
G2	箱梁	矩形	2 000	100	140	5:7
Y1	翼板	矩形	2 000	4.0	2.0	—
Y2	翼板	矩形	2 000	8.0	2.0	—

双拱肋试验模型布置、风向角定义、拱肋表面编号以及风洞试验示意图如图3所示。0°风向角时,1#面为迎风面,翼板垂直来流方向,3#面为背风面,2#和4#面分别为下表面和上表面。节段模型风洞试验现场图如图4所示。

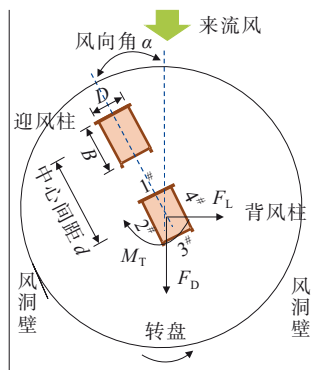


图3 双拱肋风洞试验示意图

Figure 3 Wind tunnel tests of two arch ribs

节段模型风洞试验在均匀流场中进行,模型直立固定于高精度六分量测力天平,来流风速为8 m/s。方形拱肋和矩形拱肋节段模型的展弦比(长/高)均为20,可有效减小模型长度和端部条件对测力结果的影响^[22]。

在风洞试验中,开展了独立拱肋和不同间距比双拱肋的节段模型测力试验。首先进行了0°~90°风向角下独立拱肋的测力风洞试验,然后,进行了3D、



(a) 双方柱

(b) 双矩形柱

图4 节段模型风洞试验照片

Figure 4 Wind tunnel tests of the sectional model

5D、9D和14D四种不同间距比、0°~90°风向角条件下,无翼板工况和有翼工况背风侧拱肋测力风洞试验。节段模型风洞试验工况如表2所示,表2中,工况编号规则为箱梁编号+翼板编号+中心间距比,如G1Y1-03,表示G1箱梁、Y1翼板,间距比为3;Y0表示无翼板,00表示独立柱试验。在风洞试验中,风向角角度增量为10°。

表2 节段模型风洞试验工况

Table 2 Working conditions of wind tunnel tests of the sectional model

工况	箱梁	翼板	风向角/(°)	间距比
G1Y0-00	G1	无	0~90	独立
G1Y1-00	G1	Y1	0~90	独立
G1Y2-00	G1	Y2	0~90	独立
G2Y0-00	G2	无	0~90	独立
G2Y1-00	G2	Y1	0~90	独立
G1Y0-**	G1	无	0~90	3,5,9,14
G1Y1-**	G1	Y1	0~90	3,5,9,14
G1Y2-**	G1	Y2	0~90	3,5,9,14
G2Y0-**	G2	无	0~90	3,5,9,14
G2Y1-**	G2	Y1	0~90	3,5,9,14

1.3 数据分析与处理

在风荷载作用下,节段模型的气动三分力定义如图3所示。图中, F_D 和 F_L 分别为与来流方向相同的气动阻力和与来流方向垂直的气动升力, M_T 为气动力矩,与之相对应的气动三分力系数计算公式分别为:

$$C_D = \frac{F_D}{1/2\rho U^2 D} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{1/2\rho U^2 B} \quad (2)$$

$$C_M = \frac{M_T}{1/2\rho U^2 B^2} \quad (3)$$

式中： C_D 、 C_L 、 C_M 分别为风轴坐标系下的阻力系数、升力系数和扭矩系数； ρ 为空气密度，取 1.225 kg/m^3 ； U 为来流风速，取值 8 m/s ； D 为模型特征高度； B 为模型特征宽度。对于方形模型， D 和 B 均取 0.10 m ，对于矩形模型， D 和 B 分别取 0.10 m 和 0.14 m 。

对于有翼板模型，计算气动三分力系数时，不考虑翼板对特征高度和特征宽度的影响。

为了比较迎风拱肋对背风拱肋气动阻力的遮挡效应，定义背风拱肋气动阻力降低系数，计算公式为：

$$\eta = \frac{C_{D_D}^{\text{背}}}{C_{D_D}^{\text{独}}} \quad (4)$$

式中： $C_{D_D}^{\text{背}}$ 为背风拱肋的阻力系数； $C_{D_D}^{\text{独}}$ 为独立拱肋的阻力系数。

2 方形拱肋气动力遮挡效应

2.1 串联双方形拱肋遮挡效应

串联双方形拱肋工况即为 0° 风向角工况，背风柱位于迎风柱的正后方。串联双方形拱肋工况时，背风柱气动升力和阻力系数随中心间距比的变化如图5所示，背风柱气动阻力降低系数随中心间距比的变化如图6所示。

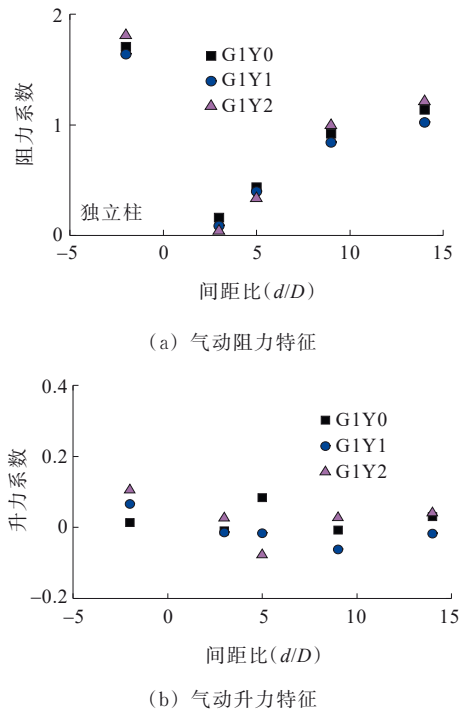


图5 串联双方柱工况背风柱气动力特征
Figure 5 Aerodynamic force characteristics of leeward square cylinders for tandem arrangement

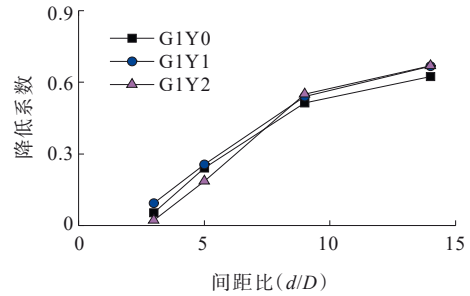


图6 串联工况背风柱气动阻力降低系数
Figure 6 Aerodynamic drag reduction coefficient of leeward cylinders for tandem arrangement

由图6可知：①翼板会使独立方形拱肋的气动力阻力增大，且大翼板(Y2)方形模型的气动阻力略大于小翼板(Y1)方形模型和标准方形模型；②迎风柱的遮挡效应对背风柱气动阻力的影响十分明显，随着中心间距比增大，遮挡效应逐渐减小，导致背风柱气动阻力逐渐增大。中心间距比达到14时，背风柱阻力约为独立单柱阻力的70%；③迎风柱的遮挡效应对气动升力的影响较小，气动升力基本接近于0；④翼板没有引起遮挡效应的显著改变，带翼板双方形拱肋的遮挡效应特征与无翼板双方形拱肋的遮挡效应特征基本相同。

2.2 风向角对双方形拱肋遮挡效应的影响

当风向角改变时，背风柱在迎风柱尾流中的位置也会发生改变，导致背风柱的气动力不同于串联双方形拱肋工况。带大翼板(Y2)双方形拱肋在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 风向角内，背风柱的气动阻力和升力随风向角的变化如图7所示。

由图7可知：背风柱的气动升力和气动阻力与中心间距和风向角密切相关，在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 风向角内，迎风柱的遮挡效应对背风柱气动力影响十分明显，气动阻力减小，气动升力增大，且随着中间间距增大，遮挡效应会逐步减弱。在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 风向角内，迎风柱的遮挡效应不明显，背风柱的气动力与独立方柱基本相同。

不同中心间距下，无翼板和带翼板双方形拱肋布置中背风柱气动阻力系数随风向角的变化如图8所示。

由图8可知：翼板对背风柱气动阻力的影响与风向角和中心间距相关。①随着中心间距的增大，翼板对背风柱气动阻力的影响随之减小，中心间距比达到14后，不同翼板的背风柱气动阻力基本相同；②不同的风向角区间，翼板对背风柱气动阻力的影响

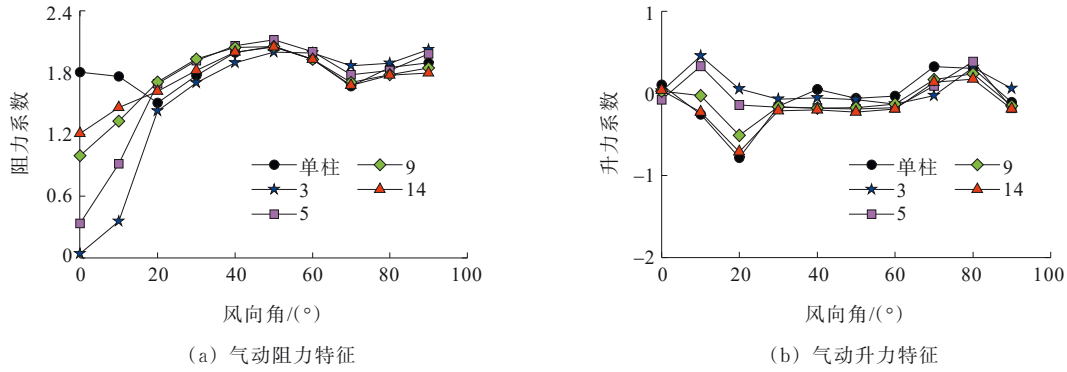


图7 带Y2翼板双方形拱肋试验背风柱气动力随风向角的变化

Figure 7 Variation of aerodynamic force on leeward cylinders with wind direction angles in test of two square arch ribs with Y2 flange

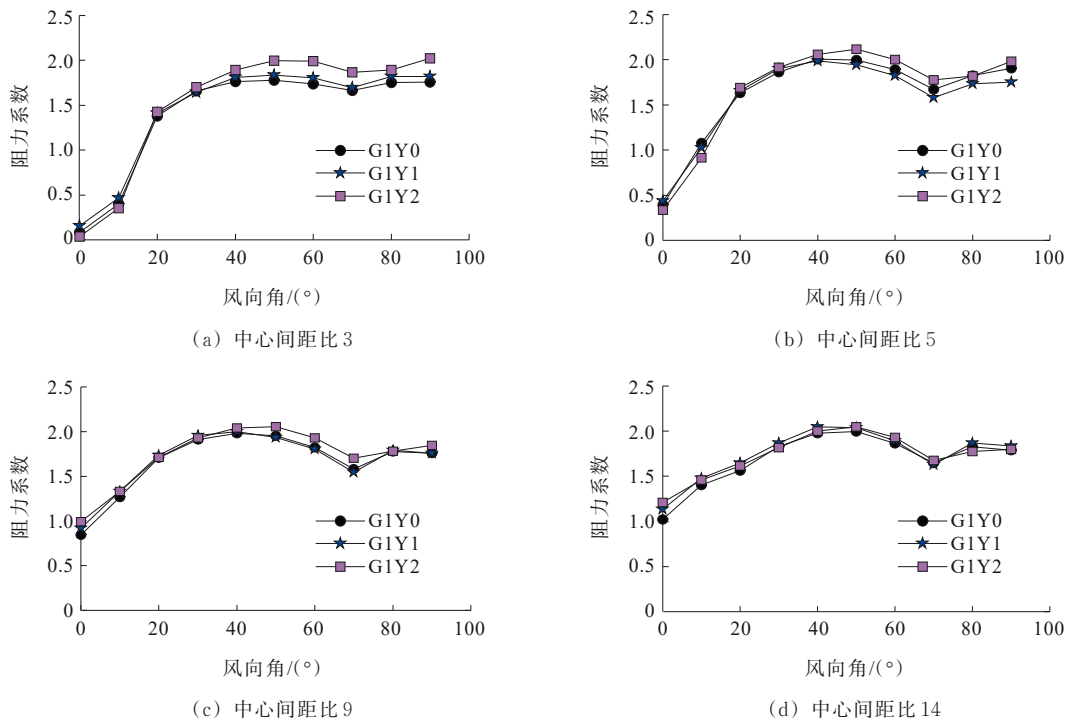


图8 无翼板和带翼板双方形拱肋的气动阻力

Figure 8 Aerodynamic drag of two square arch ribs with and without flanges

不同,在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 风向角内,迎风柱遮挡效应起主导作用,不同翼板的背风柱气动阻力基本相同,而在 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向角内,迎风柱遮挡效应减小,翼板对背风柱气动阻力的影响开始显现,Y2翼板背风柱气动阻力大于无翼板背风柱和Y1翼板背风柱。

3 矩形拱肋气动力遮挡效应

3.1 串联双矩形拱肋遮挡效应

串联双矩形拱肋工况即为 0° 风向角工况,背风柱位于迎风柱的正后方。双矩形拱肋串联布置工况下,背风柱气动阻力和升力系数随中心间距比的变化

如图9所示,背风柱气动阻力降低系数随中心间距比的变化如图10所示。由图9、10可知:①翼板使独立矩形拱肋的气动阻力增大,由标准矩形截面的1.56增加到1.98,增大约27%,增加翼板后,迎风面高度由100 mm增加到108 mm,迎风面高度增加仅8%,由此可知,气动外形改变导致流场分布改变是气动阻力增大的主要原因;②迎风柱的遮挡效应对背风柱的气动阻力影响与中心间距比密切相关,随着中心间距比增大,背风柱气动阻力逐渐增大。试验中,即使中心间距比达到14,背风柱阻力仍小于独立单柱,气动阻力降低系数约为0.6;③翼板没有引起遮

挡效应的显著改变,带翼板双矩形拱肋的遮挡效应特征与标准双矩形拱肋的基本相同。

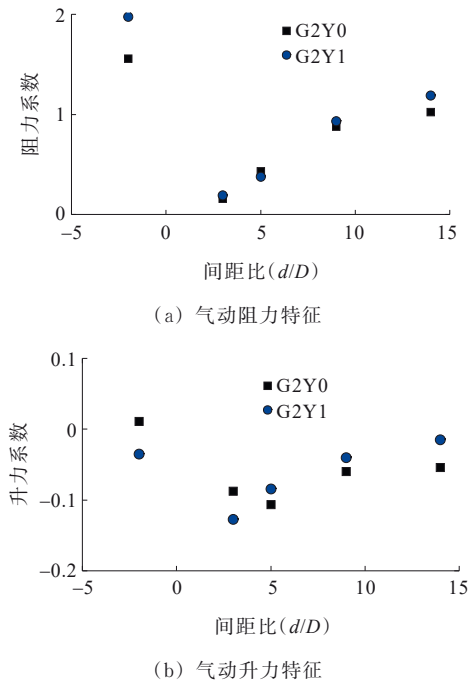


图9 串联双矩形工况背风柱气动力特征
Figure 9 Aerodynamic characteristics of leeward rectangular cylinders for tandem arrangement

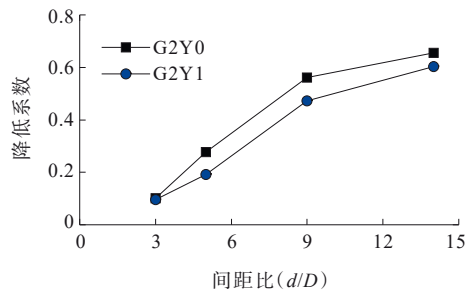


图10 串联工况背风柱气动阻力降低系数
Figure 10 Aerodynamic drag reduction coefficient of leeward rectangular cylinders for tandem arrangement

对比图5与图9可知,翼板使独立矩形截面的气动阻力增大更加明显,带翼板矩形截面的气动阻力增大27%,而带翼板方柱仅增大10%,但翼板没有显著改变方形和矩形截面的遮挡效应。

3.2 风向角对双矩形拱肋遮挡效应的影响

当来流风向改变时,处于迎风柱尾流中的背风柱相对位置会发生改变,导致背风柱的气动力不同于串联双方形拱肋工况。在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 风向角内带翼板(Y1)背风柱的气动阻力和升力系数随风向角的变化如图11所示。

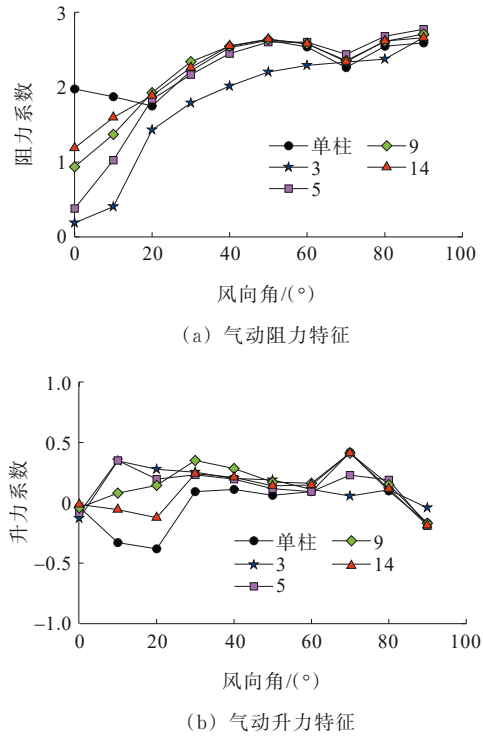


图11 带Y1翼板背风柱气动力随风向角的变化
Figure 11 Variation of aerodynamic force of leeward cylinders with Y1 flange with wind direction angles

由图11可知:迎风柱对背风柱气动力的遮挡效应与风向角和中心间距比密切相关,在 $0^\circ\sim 30^\circ$ 风向角内,迎风柱的遮挡效应会使背风柱的气动阻力显著减小、气动升力显著改变,随着中心间距比的增大,遮挡效应减弱。而在 $30^\circ\sim 90^\circ$ 风向角内,迎风柱对背风柱的遮挡效应不明显,背风柱气动升力和气动阻力与独立单柱基本相同。

4种不同中间间距的无翼板和带翼板双矩形拱肋的气动阻力随风向角的变化如图12所示。

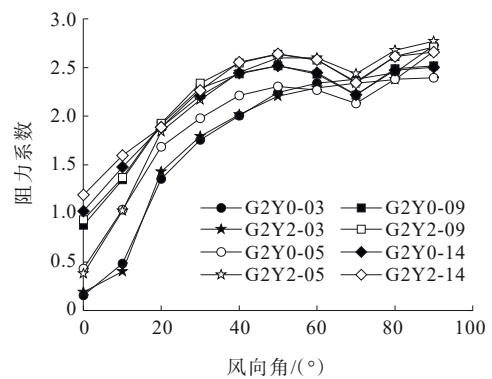


图12 无翼板和带翼板双矩形拱肋的气动阻力
Figure 12 Aerodynamic drag of two rectangular arch ribs with and without flanges

由图12可知:翼板对背风柱气动阻力的影响与中心间距比和风向角相关。当中心间距比为3时,迎风柱的遮挡效应起主导作用,翼板基本不影响背风柱气动阻力。当中心间距比大于3时,在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 风向角内,迎风柱的遮挡效应仍然起主导作用,有翼板和无翼板背风矩形拱肋气动阻力基本相同,而在 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向角内,迎风柱遮挡效应减弱,翼板对背风矩形拱肋气动阻力的影响显现,无翼板和有翼板背风矩形拱肋气动阻力出现较大差异,中心间距比为5时,差异最大。

4 结论

本文通过无翼板和有翼板双方形和双矩形拱肋节段模型测力风洞试验,研究了翼板对方形和矩形拱肋遮挡效应的影响,主要结论如下:

(1) 对于独立布置的方形和矩形拱肋,增加翼板会增大拱肋的阻力系数,翼板越大,阻力系数越大。

(2) 对于空间布置的双方形和双矩形拱肋,背风拱肋气动阻力与中心间距比和风向角密切相关。在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 风向角内,迎风柱的遮挡效应显著,随着中间间距增大,背风拱肋气动阻力逐渐增大且小于独立拱肋。在 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向角,迎风柱的遮挡效应减弱,背风拱肋气动阻力与独立拱肋基本相同。

(3) 翼板对空间布置的背风拱肋气动阻力的影响与中心间距比和风向角相关。在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 风向角内,迎风柱的遮挡效应起主导作用,翼板基本不影响背风拱肋气动阻力。而在 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向角,翼板对背风柱气动阻力的影响开始显现,翼板越大,背风柱气动阻力越大。

综上所述,空间布置的拱肋会受到明显的遮挡效应,降低尾流区的拱肋气动荷载。在结构设计时,可根据风环境主导风向角和拱肋空间布置,合理减小尾流区的拱肋气动荷载。同时,翼板会增大拱肋气动阻力,因此尽可能选用无翼板或小翼板拱肋。翼板显著改变了拱肋的气动外形,其风致振动特征也会显著改变,这一问题有待进一步研究。

参考文献:

References:

[1] 王鹏. 东莞市滨海湾大道沙涌桥总体设计[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 127-130.
WANG Peng. Overall design of shayong bridge on Binhai Bay avenue in Dongguan City[J]. Journal of China &

Foreign Highway, 2022, 42(3): 127-130.
[2] 宁平华, 王晟, 华旭刚, 等. 大跨度曲梁空间拱人行桥动力特性研究[J]. 中外公路, 2021, 41(5): 147-150.
NING Pinghua, WANG Sheng, HUA Xugang, et al. Study on dynamic characteristics of long-span footbridge with curved beam and spatial arch[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5): 147-150.
[3] 陈楚龙, 吴晓勤, 刘新华, 等. 大倾角钢箱提篮拱桥总体设计[J]. 世界桥梁, 2024, 52(1): 13-18.
CHEN Chulong, WU Xiaoqin, LIU Xinhua, et al. Overall design of a basket-handle arch bridge with steel box arch ribs of large inclination angle[J]. World Bridges, 2024, 52(1): 13-18.
[4] 金其莉, 陈建兵, 周晨. 外倾单肋曲线人行钢拱桥振动舒适度评价[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 80-86.
JIN Qili, CHEN Jianbing, ZHOU Chen. Study on vibration comfort of extraverted single-rib curved pedestrian steel arch bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1): 80-86.
[5] 王生武, 李泽东, 任伟新. 一座飞燕式系杆拱桥的有限元模型修正[J]. 中外公路, 2020, 40(6): 201-207.
WANG Shengwu, LI Zedong, REN Weixin. Finite element model updating of a flying-swallow-typed tied-arch bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(6): 201-207.
[6] 杨风利, 黄国, 牛华伟, 等. 输电塔角钢杆件阻力系数及背风面遮挡效应研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(11): 25-36.
YANG Fengli, HUANG Guo, NIU Huawei, et al. Study on drag coefficients and shielding effects of angle members in lattice transmission towers[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(11): 25-36.
[7] 牛华伟, 刘淦彬, 杨风利, 等. 钢管-角钢组合输电塔杆件体型系数及背风面风荷载折减系数的风洞试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(11): 44-53.
NIU Huawei, LIU Ganbin, YANG Fengli, et al. Wind tunnel tests on shape coefficient and shielding factor of members for tubular-angle steel transmission tower[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(11): 44-53.
[8] 张军锋, 葛耀君, 赵林. 群塔布置对冷却塔整体风荷载和风致响应的不同干扰效应[J]. 工程力学, 2016, 33(8): 15-23, 44.
ZHANG Junfeng, GE Yaojun, ZHAO Lin. Interference effects on global wind loads and wind induced responses for group hyperboloidal cooling towers[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(8): 15-23, 44.
[9] 楼文娟, 单弘扬, 杨臻, 等. 超大型阵列光伏板体型系数遮挡效应研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(5): 47-54.
LOU Wenjuan, SHAN Hongyang, YANG Zhen, et al. Study of shielding effect on shape coefficient of super-large photovoltaic arrays[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(5): 47-54.
[10] 严亚林, 唐意, 杨立国. 阵列式分布高层建筑群风致干扰

- 效应研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(11): 48-54.
YAN Yalin, TANG Yi, YANG Ligu. Wind-induced interference effect of array distributed high-rise buildings [J]. Building Science, 2021, 37(11): 48-54.
- [11] 刘小兵, 吴倩云, 姜会民, 等. 串列多圆柱气动力干扰效应的试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(7): 37-44.
LIU Xiaobing, WU Qianyun, JIANG Huimin, et al. Tests for aerodynamic force interference effect of tandem cylinders[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(7): 37-44.
- [12] 杨群, 刘庆宽, 刘小兵. 串列三圆柱绕流的时均压力分布与气动力[J]. 振动测试与诊断, 2019, 39(5): 1011-1015, 1133.
YANG Qun, LIU Qingkuan, LIU Xiaobing. Time averaged pressure distribution and aerodynamic force of flow around three circular cylinders in tandem arrangement[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(5): 1011-1015, 1133.
- [13] 杜晓庆, 许汉林, 马文勇, 等. 串列双方柱气动干扰效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(11): 27-34.
DU Xiaoqing, XU Hanlin, MA Wenyong, et al. Experimental study on aerodynamic interference effect of two square cylinders in a tandem arrangement[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(11): 27-34.
- [14] GU M, WANG X R, QUAN Y. Wind tunnel test study on effects of chamfered corners on the aerodynamic characteristics of 2D rectangular prisms[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 204: 104305.
- [15] HU J C, ZHOU Y, DALTON C. Effects of the corner radius on the near wake of a square prism[J]. Experiments in Fluids, 2006, 40(1): 106-118.
- [16] 张正维, 全涌, 顾明, 等. 斜切角与圆角对方形截面高层建筑气动力系数的影响研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 12-20.
ZHANG Zhengwei, QUAN Yong, GU Ming, et al. Effects of corner chamfering and rounding modification on aerodynamic coefficients of square tall buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(9): 12-20.
- [17] 李修坤, 吴学伟, 杨灿, 等. 双柳长江大桥主桥抗风性能风洞试验研究[J]. 中外公路, 2025, 45(6): 127-136.
LI Xiukun, WU Xuewei, YANG Can, et al. Wind tunnel test study on wind-resistant performance of ShuangLiu Yangze River suspension bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2025, 45(6): 127-136.
- [18] 孙洪鑫, 胡磊, 陈魏, 等. 检修轨道对分体式钢箱梁涡激振动影响机理研究[J/OL]. 中外公路, 1-11(2024-06-28)[2024-10-23]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1363>. U. 20240628. 0838.002.
SUN Hongxin, HU Lei, CHEN Wei, et al. Study on the influence mechanism of maintenance rail on vortex-induced vibration of twin steel box girder[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-11(2024-06-28) [2024-10-23]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1363>. U. 20240628. 0838.002.
- [19] 王琼, 汪长青, 张甲振, 等. 错列拉索尾流驰振响应特征及辅助索抑振效果试验研究[J]. 中外公路, 2021, 41(6): 114-119.
WANG Qiong, WANG Changqing, ZHANG Jiazhen, et al. Experimental study on characteristics of wake-induced vibration response of staggered stay cables and suppression effectiveness of flexible cross-Tie[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(6): 114-119.
- [20] 敬大德, 苏益. 桥梁气动外形改变对大跨桁梁桥抗风性能影响研究[J]. 中外公路, 2024, 44(1): 119-125.
JING Dade, SU Yi. Influence of aerodynamic shape change on wind resistance performance of large span truss bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(1): 119-125.
- [21] 张捷, 刘小波, 杨霄, 等. 山区峡谷大跨度斜拉桥施工阶段抖振响应及抗风索减振措施研究[J]. 世界桥梁, 2025, 53(1): 79-87.
ZHANG Jie, LIU Xiaobo, YANG Xiao, et al. Buffeting responses of long-span, valley-crossing, cable-stayed bridge in mountainous area and application of wind cables for vibration mitigation[J]. World Bridges, 2025, 53(1): 79-87.
- [22] 温青, 池俊豪, 华旭刚, 等. 端部条件和展弦比对矩形断面节段模型气动力特征的影响[J]. 实验流体力学, 2020, 34(4): 36-43.
WEN Qing, CHI Junhao, HUA Xugang, et al. Effects of end condition and aspect ratio on aerodynamic properties of rectangular sectional model[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2020, 34(4): 36-43.