

基于 CFD 的连续刚构桥主梁风荷载数值模拟研究

肖勇刚, 杨雨晨

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 基于计算流体动力学(CFD),以某高墩大跨连续刚构桥的典型断面为背景进行数值模拟,引入无量纲的静力三分力系数概念,对比分析风攻角、梁高等参数对桥梁主梁截面气动力特性的影响,并结合可视化流场分析其作用机理。结果表明,CFD 方法能直观分析钝体绕流特征及结构的气动力特性;箱梁断面升力系数受风攻角的影响较大,阻力系数受梁高的影响较大;梁高越大,主梁截面的三分力系数随风攻角变化的幅度越小,流场分布越复杂。

关键词: 桥梁;连续刚构桥;主梁风荷载;风攻角;气动力特性;计算流体动力学(CFD)

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)01-0108-04

连续刚构桥梁是公路穿越崇山峻岭的首选桥型,但其刚度小、基频低、固有周期长,必须重视风荷载的作用。在桥梁风工程研究中常采用三分力系数描述风的作用效应,其取值方法有数值模拟和风洞试验。风洞试验受模型尺寸、风场扰动、安全问题等限制,还存在费用高、周期长、布置设备不便等问题。近年来,计算流体动力学(CFD)发展迅速,CFD 方法不受物理模型和试验模型的限制,灵活性大,可重复计算,拥有强大的后处理功能,且流动可视化程度高,便于分析钝体绕流特征机理和结构的气动力特性。刘志文、汪家继等将数值模拟结果与风洞试验数据相比较,验证了数值模拟的可行性;Larsen Allan、杨咏昕等通过数值模拟,研究了不同类型断面的气动特性;Macdonald J. H. K.等建立了桥梁气动效应数值模型。该文基于 CFD 方法,对连续刚构桥主梁构件的三分力系数进行数值模拟,通过改变风攻角、梁高等条件,将不同工况下的计算结果进行对比,分析桥梁主梁截面的气动力特性。

1 流体运动控制方程

CFD 建立在流体力学基本控制方程即连续性方程、动量方程、能量方程的基础上,它们分别是质量守恒定律、牛顿第二定律、能量守恒定律的数学描述,这 3 个定律对粘性流体运动的数学描述方法就是 CFD 的基本方程组,即纳维-斯托克斯方程组。桥梁风工程研究中空气介质通常简化为不可压缩牛顿型流体,不可压缩流体流动中,由于密度不变,不需考虑能量方程。根据微元体的流体质量守恒可导出连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度。

式(1)是可压流体的质量守恒方程。不可压缩流体的密度 ρ 为常数,则式(1)变为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

该文采用二维流场进行计算,不可压缩流体二维状态下的流体动力学控制方程为:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

式中: v 为流体经过截面的平均速度。

纳维-斯托克斯方程是牛顿第二定律应用于牛顿粘性流体流动中的表达式,它反映粘性流体流动的基本力学规律,简称 N-S 方程,在直角坐标中可写成:

$$\begin{cases} \rho \frac{Dv_x}{Dt} = \rho F_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} \\ \rho \frac{Dv_y}{Dt} = \rho F_y + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau}{\partial x} \end{cases} \quad (4)$$

式中: D/Dt 为物质导数; F_x 、 F_y 为流体所受体积力; σ_x 、 σ_y 为流体正应力; τ 为流体剪应力。

计算中根据实际情况对基本方程进行各种假定建立不同数学模型。基于以上基本控制方程,可利用数值计算方法求解不同结构的静风稳定性。

2 箱梁二维流场数值模拟

2.1 三分力系数

风荷载即风的动压力,三分力系数是描述静风荷载的一组无量纲参数。平均风在桥梁构件表面会

形成流动速度不同的点,从而造成压强差,桥梁构件上下和左右表面压强差的面积分分别为桥梁的升力荷载 F_L 、阻力荷载 F_D 。升力荷载和阻力荷载同时存在并与桥梁的扭心不一致,会产生扭矩 F_M 。体轴坐标系下的静力三分力见图 1。

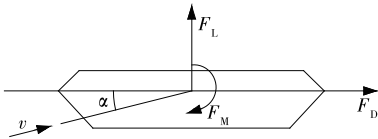


图 1 主梁体轴坐标系下的三分力

风荷载大小与主梁截面的特征尺寸在其他条件不变的前提下成比例,引入无量纲的三分力系数描述特征相同但尺寸不同的断面。在体轴坐标系下,无量纲的静力三分力系数中阻力系数、升力系数、扭矩系数分别为:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho v^2 D} \tag{5}$$

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho v^2 B} \tag{6}$$

$$C_M = \frac{2F_M}{\rho v^2 B^2} \tag{7}$$

式中: F_D 、 F_L 、 F_M 分别为桥梁主梁单位长度的阻力、升力和扭矩; ρ 为空气密度; v 为来流风速; D 、 B 分别为断面高度和宽度。

2.2 工程背景

以某高墩大跨连续刚构桥的主梁跨中断面(截面梁高 $D=2.691\text{ m}$,下同)、 $2/3L$ 主跨断面(2.94 m)、 $1/3L$ 主跨断面(3.337 m)、支点断面(4.691 m)的箱梁截面为背景,模拟分析 0° 、 $\pm 2^\circ$ 、 $\pm 4^\circ$ 、 $\pm 6^\circ$ 共 7 个风攻角下各截面的二维流场。该箱梁顶板全宽 12.75 m,设有 3% 横坡,底板宽 7 m。跨中和支点截面分别见图 2、图 3,梁截面构造见图 4。

2.3 计算域和边界条件设置

桥梁风工程中,若按主梁尺寸的实际比例建立模型,会导致网格划分工作量巨大、计算收敛过程缓慢,故数值模拟一般采用大缩尺比模型。该桥采用

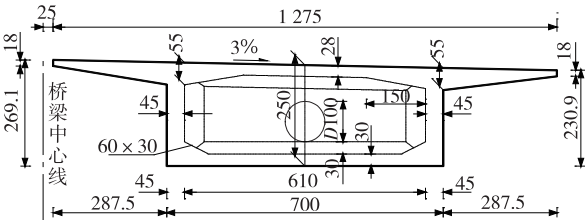


图 2 主梁跨中断面示意图(单位:cm)

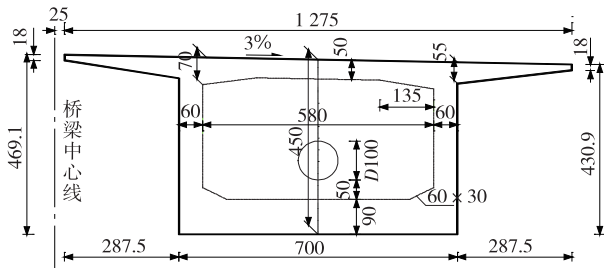


图 3 主梁支点截面示意图(单位:cm)

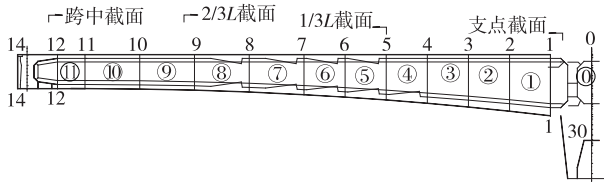


图 4 连续刚构箱梁截面构造示意图

1/40 缩尺比模型,模型梁宽约 0.32 m,入口迎风面及上下边界距模型 8 倍梁宽,背风面距模型 16 倍梁宽,计算域为 $8\text{ m} \times 5.19\text{ m}$ 的矩形。流体的模拟速度取实测风速的平均值 10 m/s,湍流强度取 0.5%,湍流粘性系数取 10。计算模型和边界条件分别见图 5、表 1。

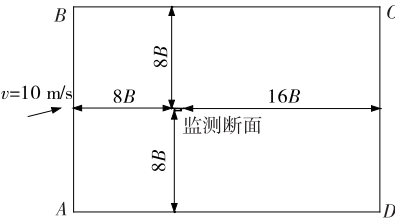


图 5 箱梁断面计算域示意图

表 1 箱梁断面边界条件

边界	不同风攻角 $\alpha(^{\circ})$ 下的边界条件	
	$\alpha=0$	$\alpha \neq 0$
AB	速度入口	速度入口 ($v_x = v \cos \alpha, v_y = v \sin \alpha$)
BC	对称边界 (symmetry)	速度入口 ($v_x = v \cos \alpha, v_y = v \sin \alpha$)
DA	对称边界 (symmetry)	速度入口 ($v_x = v \cos \alpha, v_y = v \sin \alpha$)
CD	压力出口 ($\partial p / \partial n = 0$)	
监测断面	无滑移壁面 ($v_x = 0, v_y = 0$)	

网格划分采用结构化网格,在流场变化剧烈的主梁周围和尾流发展区域采用高密度网格,周边区

域采用低密度网格,各工况计算域网格数量为 $0.98 \times 10^5 \sim 1.63 \times 10^5$ 。湍流模型选用 SST $k-\omega$,该模型在近壁区采用标准 $k-\omega$ 模型,在边界层外部转变为高雷诺数的 $k-\epsilon$ 模型。

数值模拟采用非定常分析方法,材料选用空气介质,密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 。不可压缩流场采用 SIMPLE 算法,通过二阶迎风差分格式进行离散,计算时间步长取 $5 \times 10^{-3} \text{ s}$,桥梁断面的受力达到周期性的稳定且通过计算域的流场净通量小于 0.1% 时认为计算结果收敛。

2.4 流场数值模拟结果及分析

分别改变断面梁高和风攻角 α 的取值,通过数值模拟分析主梁截面的气动力特性。图 6 为主梁跨中截面在不同攻角下的压强等高线,图 7、图 8 分别为主梁跨中、支点截面在 0° 风攻角下的压强等高线和速度流线分布。

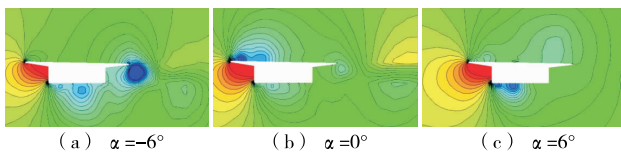


图 6 不同风攻角下跨中截面压强等高线

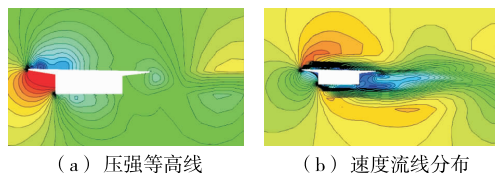


图 7 0° 风攻角下跨中截面压强分布及流速线分布

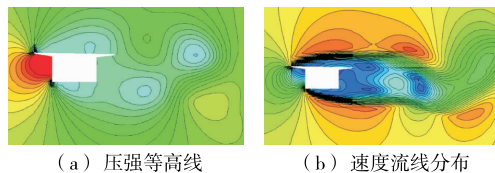


图 8 0° 风攻角下支点截面压强分布及流速线分布

由图 6 可知:跨中断面的迎风面为较大正压,上下表面和背风面均出现负压;迎风面与上下表面交界处压强梯度变化较大,箱梁底板出现大小不同但形状相似的压力漩涡;背风面形成涡旋脱落, -6° 风攻角下翼缘板下游出现尾流漩涡,并随着风攻角的增大和气流的移动涡流逐渐脱落。

由图 7、图 8 可知:1) 梁支点截面周围压力漩涡比跨中截面大,其后缘还出现圆形的等压力区,背风面的负压力漩涡也随着梁高的增大而增大。说明梁

高越大,周围的流场分布越复杂。2) 风速在各截面的前缘和梁底棱角发生明显分离,并有部分返回;外部流动区域风速较大,断面上下边界层和背风侧风速较小;背风面出现速度漩涡,并随着梁高的增大而增多。说明随着梁高的增大,截面钝体特征越明显,流场分布越复杂。

3 断面形式抗风数据研究

山区风场受焚风效应和地方性风等影响,风攻角比平原地区大,连续刚构桥研究中更应注重风攻角的作用。箱梁支点截面和跨中截面在各风攻角下的三分力系数见表 2,各截面三分力系数在 0° 风攻角下随梁高的变化见图 9,跨中截面、 $2/3 L$ 截面和支点截面静力三分力系数计算结果见图 10~12。

表 2 跨中和支点截面静力三分力系数计算结果

截面位置	梁高/ m	风攻角/ ($^\circ$)	阻力 系数	升力 系数	扭矩 系数
跨中	2.691	-6	1.253	-0.259	-0.119
		-4	1.205	-0.064	-0.151
		-2	1.046	0.224	-0.183
		0	1.060	0.463	-0.202
		2	1.029	0.591	-0.164
		4	0.988	0.487	-0.133
		6	1.003	0.387	-0.111
		-6	1.473	0.279	-0.188
		-4	1.404	0.524	-0.184
		-2	1.408	0.480	-0.170
支点	4.691	0	1.414	0.452	-0.162
		2	1.396	0.421	-0.154
		4	1.439	0.444	-0.154
		6	1.475	0.460	-0.153

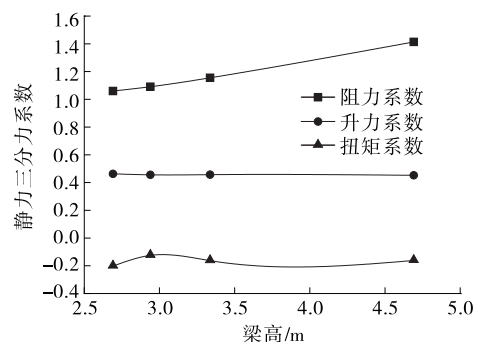


图 9 三分力系数在 0° 风攻角下随梁高的变化

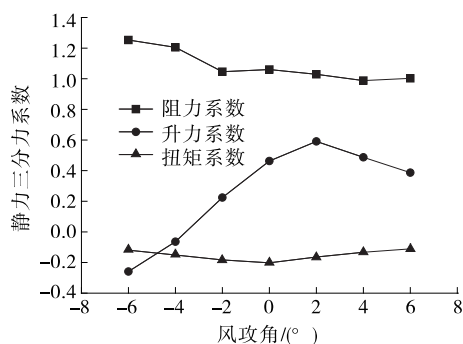


图10 跨中截面三分力系数随风攻角的变化

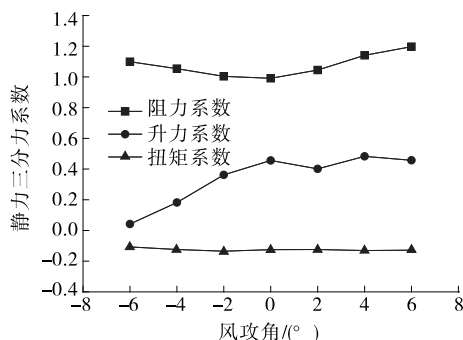


图11 2/3L截面三分力系数随风攻角的变化

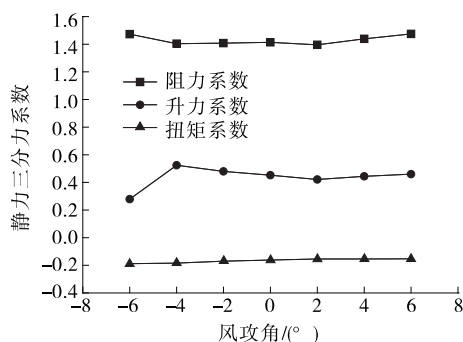


图12 支点截面三分力系数随风攻角的变化

由表2可知:截面的静力三分力系数随梁高变化而变化;各风攻角下箱梁支点截面的阻力系数均大于跨中截面;跨中截面的升力系数有部分负值,而支点截面始终为正;扭矩系数鲜有变化。

由图9可知:阻力系数随着梁高的增大而增大,而三分力系数大,在强风作用下箱梁断面所受的三分力越大,桥梁的抗风稳定性越差。因此,桥梁设计中应多选用扁平、低矮、近流线型的断面形式。

结合表2和图10可知:跨中截面的阻力系数为0.988~1.253,升力系数为-0.259~0.591,扭矩系数为-0.202~-0.111,风攻角对跨中截面升力系数的影响最显著,对扭矩系数的影响较小。这是因为风攻角的改变主要会引起箱梁上下表面压力差的

变化,造成升力荷载改变,导致不同攻角下升力系数有明显差异。在 $-6^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 风攻角下,升力系数变化较大且始终随着风攻角的增大而增大。风攻角大于 2° 时,风力主要作用在梁体的底面和侧面,受到翼缘板的阻挡,升力系数随着风攻角的增大呈现负斜率。此外,跨中截面的阻力系数随风攻角的增大而减小,扭矩系数随风攻角绝对值的增大而增大。

由图11可知:2/3L主梁截面的三分力系数变化幅度比跨中截面小,其中阻力系数随着风攻角绝对值的增大而增大,升力系数变化规律与跨中截面相似,扭矩系数无明显变化。

结合表2和图12可知:支点截面的阻力系数为1.396~1.475,升力系数为0.279~0.524,扭矩系数为-0.188~-0.153,扭矩系数随着风攻角的增大略有增大。支点截面的三分力系数变化幅度比跨中截面和2/3L截面小得多,钝体特征明显。

4 结论

(1) CFD方法能以压力云图、流速迹线云图等形式直观显示物理量在流场内的分布情况,其重复性好,可视化程度高,可用于钝体绕流特征机理及结构气动力特性分析。

(2) 各箱梁截面的三分力系数随风攻角的变化呈规律性变化,风攻角的变化对截面升力系数的影响最明显,对扭矩系数的影响最小。

(3) 主梁截面高度对阻力系数的影响最大,对扭矩系数的影响较小。随着梁高的增大,主梁截面三分力系数随风攻角变化的幅度逐渐减小。同时梁高越大,截面的阻力系数越大,截面钝体特征越明显,周围流场分布越复杂。

参考文献:

- [1] 刘志文,陈政清.串列双幅典型断面三分力系数气动干扰效应[J].振动与冲击,2015,34(5).
- [2] 汪家继,樊健生,聂建国,等.大跨度桥梁箱梁的三分力系数识别研究[J].工程力学,2016,33(1).
- [3] Larsen Allan. Advance in aeroelastic analyses of suspension and cable-stayed bridges[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 34(1).
- [4] 杨咏昕,周锐,张凯歌,等.不同风嘴形式分体箱梁桥梁的静力风致稳定性[J].土木工程学报,2016,49(6).
- [5] Macdonald J H K, Larose G L. A unified approach to aerodynamic damping and drag/lift instabilities and its

(下转第115页)

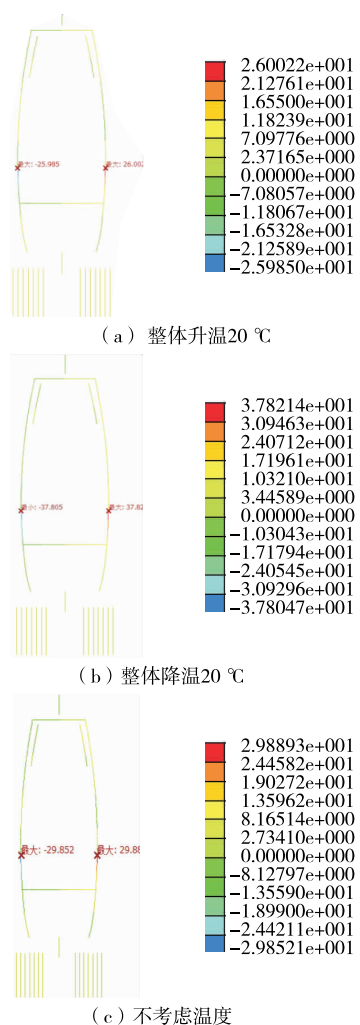


图 7 不同温度工况下主塔位移云图(单位:mm)

大位移为 $37.8 \text{ mm} < L/3\ 000 = 125 \times 1\ 000/3\ 000 = 41.67 \text{ mm}$ (L 为塔柱高度), 满足规范要求。

4 结语

该文针对大跨度斜拉桥主塔结构在施工荷载作用下的受力性能和变形进行计算分析, 主要结论如

下: 1) 主塔关键截面的最大压应力为 23.1 MPa , 最大拉应力为 1.73 MPa , 均满足规范要求; 2) 有效的横撑设置可使主塔横向位移减少 52.78 mm , 使变形在允许范围内; 3) 温度降低 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 局部位移变形增加 7.95 mm , 需加强变形观测和控制。

该桥主塔横撑设置方式和桥梁受力分析方法可为同类桥梁设计提供参考。考虑到该桥跨径只有 328 m , 塔高也不大, 计算结果存在一定局限性, 且桥塔形状独特, 参考时需注意主塔内倾角及横撑设置高度, 有限元模型建立宜采用以曲代直的方法。

参考文献:

- [1] 曹永睿, 李艳花. 斜拉桥主塔钢混结合段受力分析研究[J]. 市政技术, 2013, 31(4).
- [2] 姚寅初. 斜拉桥塔梁临时固结节段主塔局部受力特性分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [3] 刘占兵, 左生荣, 魏英明, 等. 丹江口汉江大桥下横梁支架施工结构分析[J]. 交通科技, 2014(6).
- [4] 程强. 基于 MIDAS/Civil 的水上钢支架受力分析[J]. 建筑技术开发, 2016, 43(9).
- [5] 陈冠, 殷新锋, 刘扬. 静载作用下桥梁结构受力分析[J]. 公路与汽运, 2018(2).
- [6] 姚德波, 汪林, 殷新锋. 嘉鱼长江公路大桥主塔下横梁支架计算分析[J]. 公路与汽运, 2018(2).
- [7] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- [8] JTG D60—015, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [9] JTG/T D60—01—2016, 公路桥梁抗风设计规范[S].
- [10] 刘志权, 石雪飞, 阮欣. 空间索面斜拉桥索塔钢锚梁性能及足尺模型试验[A]. 第 20 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册)[C]. 2011.

收稿日期: 2018—06—13

(上接第 111 页)

- application to dry inclined cable galloping[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006, 22(2).
- [6] 阎超. 计算流体力学方法及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
 - [7] 金家传. 基于 CFD 方法的大跨双幅桥梁气动干扰效应研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
 - [8] 王润建, 李海光. 基于 CFD 方法的大跨高墩刚构桥梁风荷载数值识别[J]. 公路交通科技, 2010, 27(10).

- [9] 戴天帅. 基于 CFD 桥梁典型断面三分力系数差异分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [10] 安里鹏, 李德建, 王元礼, 等. 基于 CFD 方法的高墩大跨箱梁桥静风力系数参数影响研究[J]. 应用力学学报, 2016, 33(1).
- [11] 程浩. 基于计算流体力学(CFD)的大跨度桥梁风效应数值模拟[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(3).

收稿日期: 2018—03—20