

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.11.011

闭口箱形主梁断面三分力系数二维大涡模拟

刘志文¹, 胡建华², 陈政清¹, 龙海滨²

(1. 湖南大学 风工程试验研究中心, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙 410008)

摘要: 采用二维大涡模拟方法对雷诺数为 $Re = 3.73 \times 10^5$ 的某大跨度斜拉桥主梁断面成桥状态和施工状态三分力系数进行了数值模拟, 并与风洞试验结果进行了对比; 在此基础上针对防撞护栏对桥梁主梁断面的三分力系数的影响进行了数值模拟和试验研究。结果显示: 该桥主梁断面成桥状态、施工状态三分力系数数值模拟结果与风洞试验结果吻合良好。风攻角为 $\alpha = 0^\circ$ 时, 主梁断面成桥状态的阻力系数、升力系数、升力矩系数的数值模拟结果比试验结果分别偏小约 6.84%、1.39%、7.42%; 主梁断面施工状态阻力系数数值模拟结果比试验结果偏小约 0.72%, 而升力系数、升力矩系数数值模拟结果与试验结果相对误差较大。钢防撞护栏对本文所研究的主梁断面阻力系数的贡献率约为 30% 左右, 而对升力系数和升力矩系数的影响则不明显。

关键词: 桥梁工程; 闭口箱梁断面; 大涡模拟; 三分力系数; 风洞试验; 护栏

中图分类号: U448.273.35⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2011)11-0061-06

2D Large Eddy Simulation of Aerostatic Coefficients of a Closed-box Main Girder Section

LIU Zhiwen¹, HU Jianhua², CHEN Zhengqing¹, LONG Haibing²

(1. Wind Engineering Research Center, Hunan university, Changsha Hunan 410082, Chin;

2. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute, Changsha Hunan 410002, China)

Abstract: The aerostatic coefficients of the main girder section of a long-span cable-stayed bridge ($Re = 3.73 \times 10^5$) with/without barriers were simulated using 2D large eddy simulation (LES). The numerical simulation result was compared with the wind test result. Furthermore, the effect of barriers on aerostatic coefficients of the main girder section was investigated by numerical and experimental methods. The research results show that (1) The numerical simulation result of aerostatic coefficients of the main girder section agree well with the experimental result. For the attack angle of 0° , the numerical results of the drag, lift and pitch moment coefficients of the main girder section with barriers are less than the experimental results of those by 6.84%, 1.39% and 7.42% respectively. (2) The numerical result of drag coefficient of the main girder section without barriers are less than the experimental results by 0.72%, while there are great relative errors between the numerical results and experimental results of lift and pitch coefficients of the main girder section without barriers. (3) The contribution ratio of steel barriers on the drag coefficient of the main girder section is about 30%, while it has no significant effect on the lift and pitch coefficients of the main girder section.

Key words: bridge engineering; closed-box girder bridge section; large eddy simulation (LES); aerostatic coefficient; wind tunnel test; barrier

收稿日期: 2011-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(50608030); 国家自然科学基金项目(50738002)

作者简介: 刘志文(1975-), 男, 山西阳高人, 副教授, 博士。(zhiwenliu@hnu.edu.cn)

0 引言

随着桥梁结构跨度的增加,其结构刚度明显降低,由风引起的桥梁结构振动响应与风荷载效应将是这类大型桥梁结构设计时要考虑的主要因素。如已建成的最大跨度悬索桥——明石海峡大桥(主跨 1 991 m)和最大跨度斜拉桥——苏通长江公路大桥(主跨为 1 088 m)设计中都对风效应进行了相应研究。目前大跨度桥梁结构抗风设计主要依靠风洞试验,并辅以数值模拟。随着计算机硬件的提高,采用计算流体力学方法对大跨度桥梁结构主要构件断面气动力系数计算逐渐成为可能。Allen Larsen 和 Walther^[1]、周志勇^[2]分别采用离散涡方法对桥梁主梁断面三分力系数和气动导数等进行了数值模拟。Giuseppe Vairo 采用二维 $k-\varepsilon$ RNG 紊流模型对丹麦大海带东桥、法国诺曼底大桥主梁断面成桥状态三分力系数和气动导数进行了数值模拟,数值模拟结果与已有试验结果总体吻合良好^[3]。Sun 和 Owen 等采用 $k-\varepsilon$ 雷诺平均模型对二维矩形钝体断面的三分力系数和气动导数进行了数值模拟,研究显示 $k-\varepsilon$ 雷诺平均模型可以较为准确地模拟钝体断面气动性能^[4],值得注意的是该文献所研究的断面外形比较简单,而实际桥梁断面外形一般比较复杂。苑明顺采用大涡模拟方法和复合式柱面固壁条件对亚临界区 ($Re = 1.4 \times 10^6$) 圆柱绕流进行了二维数值模拟,得到了比较合理的主要流动参数,如圆柱断面的 Strouhal 数、阻力系数、升力系数、柱面时均压力分析以及涡街几何特性^[5]。Selvam 等采用大涡模拟方法对丹麦大海带东桥引桥主梁断面的三分力系数和斯托罗哈数进行了数值模拟,模拟结果与试验结果吻合良好^[6]。Bruno 和 Khrih 分别采用 RANS 和 LES 模型对大海带东桥主梁断面气动性能进行了数值模拟,并将数值模拟结果与风洞试验结果进行了对比^[7]。王元成、吴文权采用大涡模拟方法对雷诺数为 2.2×10^4 的方柱绕流进行了数值模拟,研究表明三维模型的模拟结果优于准三维 LES 模型和二维 RNG 模型模拟结果,大涡模拟方法的三维模型能够更好地描述钝体绕流流场^[8]。Sarwar 和 Ishihara 等分别采用 $k-\varepsilon$ 模型和 LES 模型对闭口流线型断面的三分力系数和颤振导数进行了数值模拟,并对桥梁主梁断面的细部构造对其气动性能的影响进行了模拟,研究显示: $k-\varepsilon$ 模型模拟结果与试验结果相差较大,而 LES 模型模拟结果与试验结果吻合良好^[9]。Selvam 以大海带东桥为例分别建立了二维网格和三

维网格,对其三分力系数进行了计算,研究显示当雷诺数 $Re > 50\ 000$ 时,二维模拟具有足够的精度^[10]。陈艾荣、艾辉林以方柱为例,分别对二维网格和三维网格进行了大涡模拟,结果显示二维和三维大涡模拟数值结果均与试验结果吻合较好,三维大涡计算结果整体略好于二维大涡模拟结果,但二维大涡模拟计算效率远高于三维大涡模拟,因此从工程应用的角度考虑,二维大涡模拟的计算精度是可以接收的^[11]。综合计算精度和计算效率,从工程应用实际的角度考虑,本文决定选择二维大涡模拟方法对某拟建的 4 塔斜拉桥主梁断面的三分力系数进行数值模拟,并将数值模拟结果与风洞试验结果进行对比,以验证本文计算方法的精度。在此基础上,针对钢护栏对桥梁主梁断面三分力系数的影响进行了试验与数值模拟研究。

1 数值方法

1.1 基本方程

实际大气湍流中包含了不同时间与空间尺度的漩涡。空间大尺度漩涡通常为平均流动的特征长度尺度,而小尺度漩涡则为 Komogrov 尺度。LES 的基本假设是:(1) 动量、能量、质量及其他标量主要由大涡输送;(2) 流动的几何和边界条件决定了大涡的特性,且流动特性主要在大涡中体现;(3) 小尺度漩涡受几何和边界条件影响较小,并且各向同性,大涡模拟过程中,直接求解大涡,而利用亚网格尺度模型模拟小尺度紊流运动对大尺度紊流运动的影响。

LES 的控制方程是通过将 N-S 方程进行空间滤波得到的,滤波的过程是去掉比过滤尺度小的漩涡,从而得到不可压缩的大涡控制方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度; $u_i u_j$ 为速度分量; p 为压力; μ 为运动粘性系数; τ_{ij} 为亚网格应力, $\tau_{ij} = \rho u_i u_j - \rho \overline{u_i u_j}$, 带有上画线的量为滤波后的场变量。

Smagorinsky 于 1963 年提出了亚格子模型,直至今日该模型仍然被广泛应用,与大多数现行的亚格子模型一样,Smagorinsky 模型仍然采用涡粘性概念假设,与所求解速度场相关联的拉伸张量分量 S_{ij} 的

偏斜部分 τ_{ij}^a 可以表示为

$$\tau_{ij}^a = \tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\gamma_t \bar{S}_{ij}, \quad (3)$$

式中, γ_t 为涡粘性系数; δ_{ij} 为 Kroneker 符号 (当 $i=j$ 时 $\delta_{ij}=1$; 当 $i \neq j$ 时 $\delta_{ij}=0$); \bar{S}_{ij} 为滤波后的变形速率张量, $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ 。

Smagorinsky 模型假设 $\gamma_t \propto l \cdot q_{SCS}$, 其中 l 是未求解涡运动的长度尺度, q_{SCS} 是对应的速度比尺。假设 $l = C_s \cdot \Delta$, Δ 与普朗特的混合长假设相类似, 速度比尺 q_{SCS} 与速度梯度直接相关, 即 $q_{SCS} = l |\bar{S}| = l \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$, 所以

$$\gamma_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}. \quad (4)$$

对于各向同性紊流, 在 Kolmogorov 能谱惯性次区范围内, 可以推导得 C_s 得取值大致为 0.18。而实际数值试验证明该值取值过大, 一般取为 0.10。

1.2 主梁断面几何参数

赤石大桥位于湖南省郴州某高速公路上, 是一座 4 塔预应力混凝土斜拉桥, 跨径布置为 $165 + 380 + 380 + 380 + 165 = 1470$ m, 主梁为预应力混凝土箱形断面, 主梁宽为 $B=28$ m, 梁高为 $H=3.2$ m, 成桥状态主梁断面见图 1。

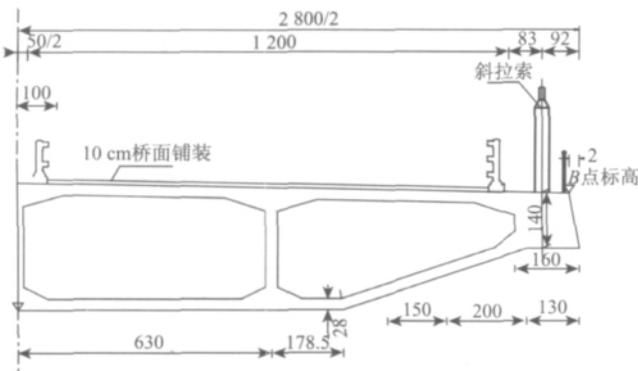


图 1 赤石大桥主梁标准断面图 (单位: cm)
Fig. 1 Standard main girder section of Chishi bridge (unit: cm)

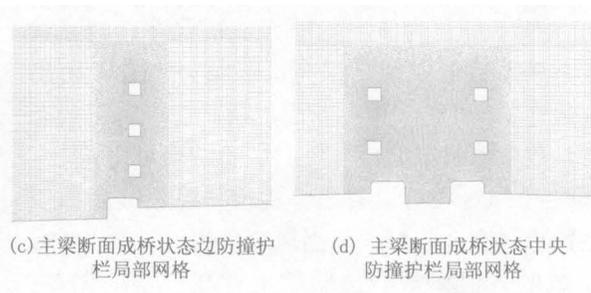
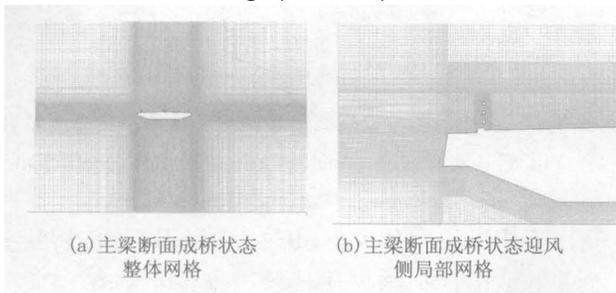


图 3 主梁断面成桥状态网格划分

Fig. 3 Mesh of main girder section with barriers

1.3 计算模型与网格划分

图 2 所示为赤石大桥主梁断面的计算域及边界条件, 上游速度入口距模型上游的距离为 $2B$, 下游压力出口距模型下游的距离为 $6B$, 上下侧速度入口边界距模型中心的距离为 $2B$ 。采用分块四边形结构网格以提高计算效率, 断面附近区域采用加密的结构化网格以提高计算精度, 接近桥面及护栏附近采用加密网格, 在远离主梁断面的区域采用间距较大的结构化网格以提高计算效率。为了考虑桥面防撞护栏的影响, 在防撞护栏附近采用了局部三角形网格。图 3 所示为主梁断面成桥状态网格划分图, 离模型最近的一层网格厚度为 $0.001 2B$, 网格总数为 229 480。图 4 所示为主梁断面施工状态网格划分图, 在靠近模型的周边采用了边界层网格, 模型最近的一层网格厚度为 $0.000 7B$, 网格总数为 149 660。

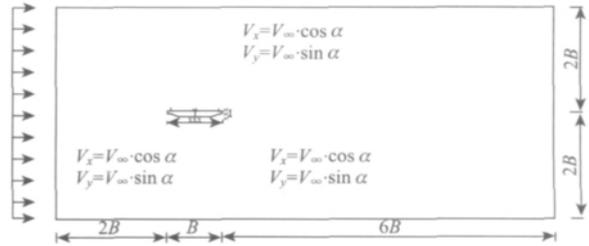


图 2 赤石大桥主梁断面 CFD 计算域及边界条件

Fig. 2 Computational domain and boundary conditions of main girder section of Chishi bridge

1.4 计算参数设置

采用 LES 亚格子 Smagorinsky-Lilly 湍流模型, 具体参数取值如下: $C_s = 0.10$, 能量普朗特数为 0.85, 壁面普朗特数为 0.85。考虑到无论在风洞试验还是实际桥梁周围, 真实的风环境中不可避免的会有一定的湍流成分, 在计算中定义入口处的湍流强度为 0.5%, 湍流粘性比为 10, 以便于与风洞试验结果进行对比。边界条件设置如下: 计算区域左侧、上下侧均设定为速度入口, 速度分别为: $V_x = V_\infty \cos \alpha$, $V_y = V_\infty \sin \alpha$, α 为风攻角, 来流风速 $V_\infty = 10$ m/s;

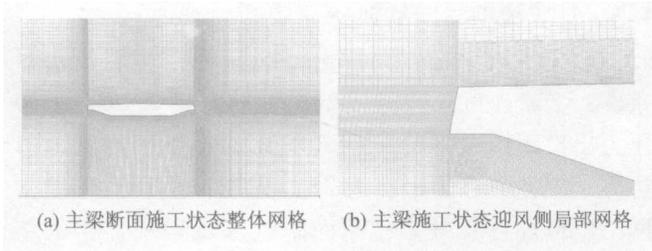


图4 主梁断面施工状态网格划分

Fig. 4 Mesh of main girder section without barriers

计算域右侧为压力出口, 相对压强为 0 Pa, 工作压力为 1 个标准大气压。计算模型缩尺比取为 $\lambda_L = 1/50$, 雷诺数为 $Re = 3.73 \times 10^5$ (以桥宽为参考宽度, $B = 0.56$ m); 时间步为 $\Delta t = 0.005$ s。针对主梁断面成桥状态 (带防撞护栏) 和施工状态 (未安装防撞护栏) 进行了风攻角分别为 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\pm 3^\circ$ 、 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 时的三分力系数数值模拟。

2 数值模拟结果

2.1 数值模拟结果与试验结果比较

主梁断面三分力系数定义如下:

$$C_D = \frac{F_H}{1/2\rho V_\infty^2 HL}, \quad (5)$$

$$C_L = \frac{F_V}{1/2\rho V_\infty^2 BL}, \quad (6)$$

$$C_M = \frac{M}{1/2\rho V_\infty^2 B^2 L}, \quad (7)$$

式中, V_∞ 为来流风速; 空气密度 $\rho = 1.225$ kg/m³; L 为模型长度, 阻力系数以主梁高度 H 为参考长度, 升力系数和升力矩系数以主梁断面的宽度 B 为参考长度。限于篇幅, 图 5、图 6 分别给出风攻角为 $\alpha = 0^\circ$ 时主梁断面成桥状态、施工状态时周围流场速度等值线及三分力系数时程曲线。为了检验桥梁断面三分力系数 CFD 数值模拟精度, 分别针对主梁断面成桥状态、施工状态进行了节段模型测力试验, 模型缩尺比为 1:50, 模型长度 L 、宽度 B 和高度 D 分别为 1.50、0.56、0.064 m, 试验风速为 $V_\infty = 10$ m·s⁻¹。图 7 所示分别为该主梁断面成桥状态、施工状态三分力系数数值模拟结果与试验结果, 表 1 给出了风攻角为 $\alpha = 0^\circ$ 时, 主梁断面成桥状态、施工状态三分力系数数值模拟结果与风洞试验结果对比。

从图 7 (a) 中可以看出, 成桥状态主梁断面三分力系数总体吻合较好, 仅当风攻角为 $\alpha = +10^\circ$ 时, 阻力系数的数值模拟与试验结果存在一定的误差; 从图 7 (b) 中可以看出, 主梁断面施工状态三分力系数数值模拟结果与试验结果吻合良好。从表 1 中

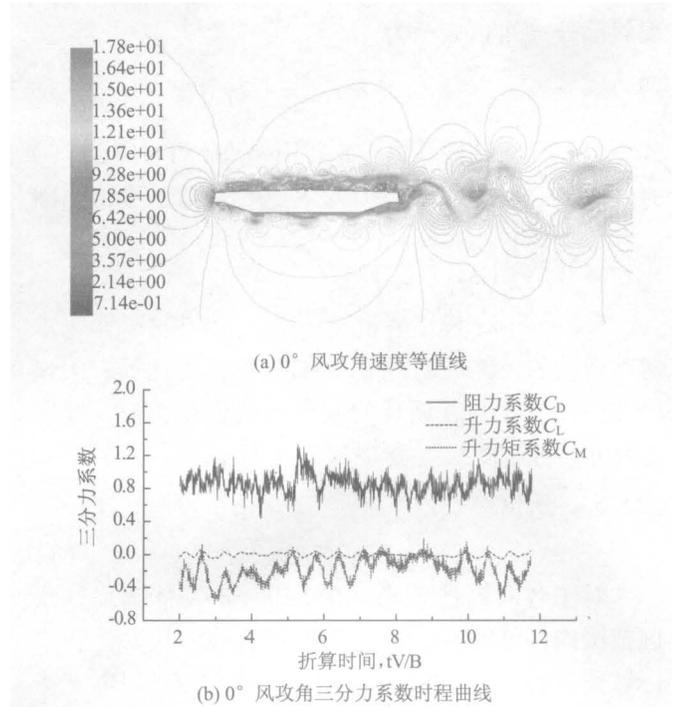


图5 主梁断面成桥状态速度等值线和三分力系数

Fig. 5 Contoured velocities and aerostatic coefficients of main girder section with barriers

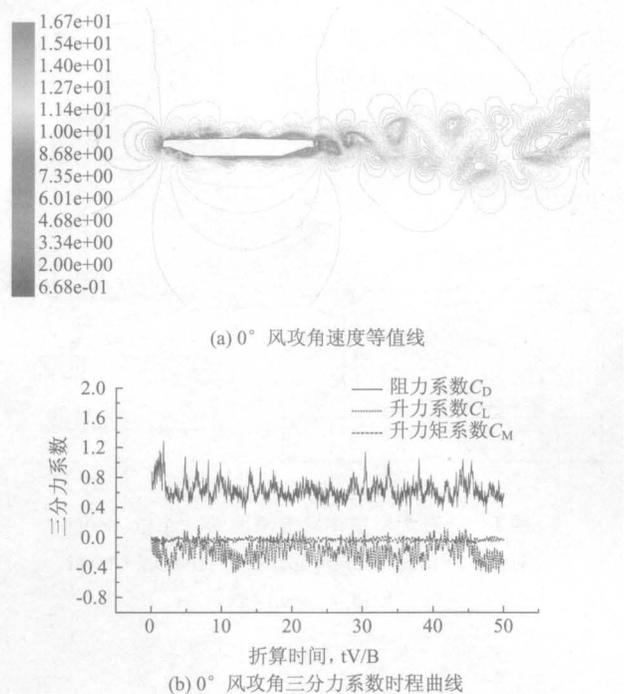


图6 施工状态主梁断面流场速度等值线及三分力系数

Fig. 6 Contoured velocities and aerostatic coefficients of main girder section without barriers

可以看出, 风攻角为 $\alpha = 0^\circ$ 时, 主梁断面成桥状态阻力系数数值模拟结果比试验结果偏小约 6.84%, 主梁断面施工状态阻力系数数值模拟结果比试验结果偏小约 0.72%; 主梁断面成桥状态升力系数、升力

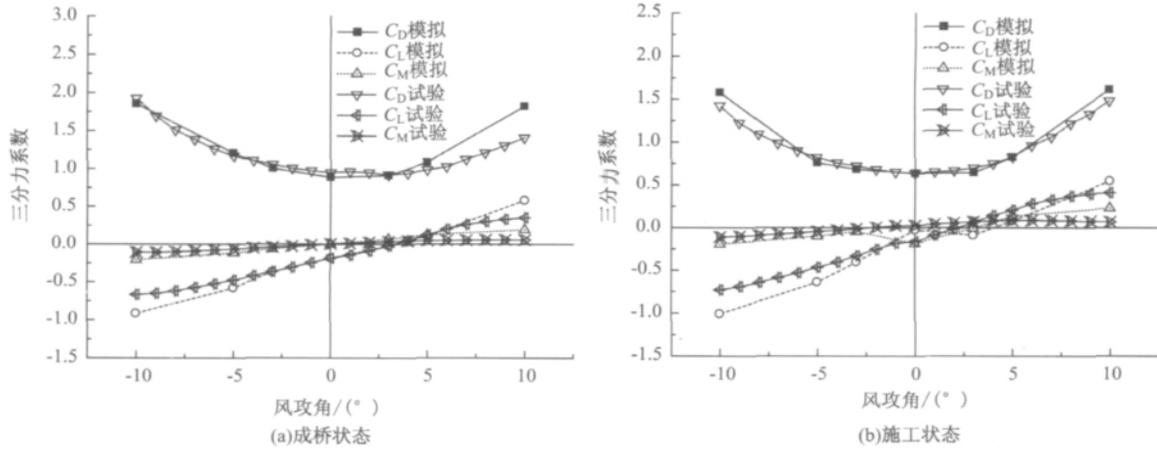


图 7 主梁断面三分力系数数值模拟与风洞试验结果对比

Fig. 7 Comparison of aerostatic coefficients of main girder section between numerical simulation result and experimental result

表 1 三分力系数数值模拟与试验结果比较

Tab. 1 Comparison of aerostatic coefficients barriers between numerical simulation result and experimental result

主梁断面状态	三分力系数	LES 模拟结果	试验结果	误差 /%
成桥状态 (带防撞护栏)	阻力系数 C_D	0.884 5	0.949 4	-6.84
	升力系数 C_L	-0.184 6	-0.187 2	-1.39
	升力矩系数 C_M	0.002 9	0.003 1	-7.42
施工状态 (不带防撞护栏)	阻力系数 C_D	0.633 5	0.638 1	-0.72
	升力系数 C_L	-0.027 8	-0.162 4	/
	升力矩系数 C_M	-0.186 2	0.025 7	/

矩系数分别比试验结果偏小约 1.39%、7.42%；主梁断面施工状态升力系数、升力矩系数数值模拟结果与试验结果相对误差较大。

2.2 防撞护栏对主梁断面三分力系数的影响

为了研究桥梁主梁断面附属设施（防撞护栏）对主梁断面三分力系数的影响，将同一风攻角下的主梁带防撞护栏和不带防撞护栏对应的三分力系数进行比较，图 8 所示为防撞护栏对主梁断面阻力系数、升力系数和升力矩系数影响的试验结果与数值模拟结果。从图 8 中可以看出，钢防撞护栏对主梁断面阻力系数的贡献率约为 30% 左右，而对升力系数和升力矩系数的影响则不明显。

3 结论

通过对赤石大桥主梁断面三分力系数的数值模拟与试验研究，得到如下主要研究结论：

(1) 采用二维大涡模拟方法模拟闭口流线型箱梁断面三分力系数具有足够的精度，数值模拟结果

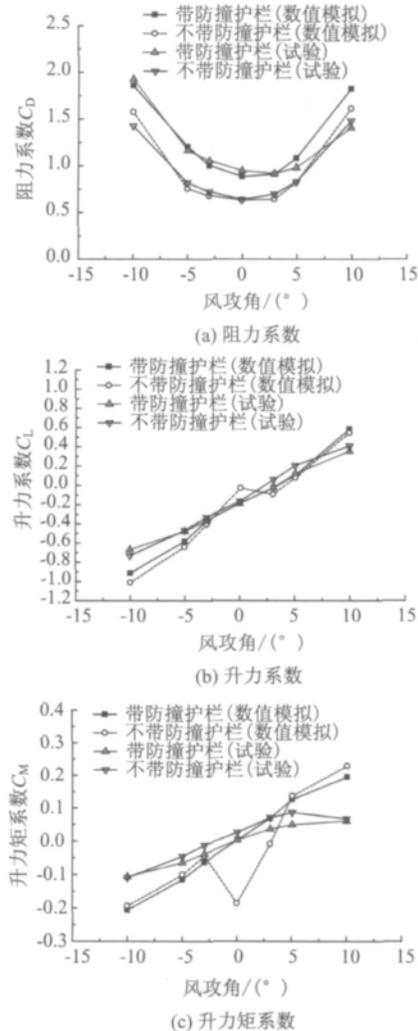


图 8 防撞护栏对主梁断面三分力系数的影响

Fig. 8 Effect of barriers on aerostatic coefficients of main girder section

与试验结果吻合良好,表明对于实际桥梁结构断面(如主梁断面、桥塔、桥墩断面等)在结构初步设计阶段采用大涡模拟方法模拟得到的气动力系数具有足够精度,可应用与桥梁抗风设计实践中;

(2) 钢防撞护栏对本文所研究的主梁断面阻力系数的贡献率约为30%左右,而对升力系数和升力矩系数的影响则不明显。

参考文献:

References:

- [1] LARSEN A, WALTHER J H. Aeroelastic Analysis of Bridge Girder Sections Based on Discrete Vortex Simulations [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 67/68: 253 - 265.
- [2] 周志勇. 离散涡方法用于桥梁截面气动弹性问题的数值计算 [D]. 上海: 同济大学, 2001.
ZHOU Zhiyong. Discrete Vortex Methods for Application to the Numerical Simulation of Aeroelastic Problem of Bridge Decks [D]. Shanghai: Tongji University, 2001.
- [3] VAIRO G. A Numerical Model for Wind Loads Simulation on Long-span Bridges [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2003, 11 (5/6): 315 - 351.
- [4] DUN D, OWEN J S, WRIGHT N G. Application of the $k-\omega$ Turbulence Model for a Wind-induced Vibration Study of 2D Bluff Bodies [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97 (2): 77 - 87.
- [5] 苑明顺. 高雷诺数圆柱绕流的二维大涡模拟 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1992, 7 (增): 614 - 622.
YUAN Mingshun. Two-dimensional Large Eddy Simulation of Flow Past a Circular Cylinder at High Reynold Number [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1992, 7 (S): 614 - 622.
- [6] SELVAM R P, TARINI M J, LARSEN A. Computer Modelling of Flow Around Bridges Using LES and FEM [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 77/78: 643 - 651.
- [7] BRUNO L, KHRIS S. The Validity of 2D Numerical Simulations of Vertical Structures around a Bridge Deck [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2003, 37: 795 - 828.
- [8] 王元成, 吴文权. 方柱绕流的大涡模拟 [J]. 上海理工大学学报, 2005, 27 (1): 27 - 31.
WANG Yuancheng, WU Wenquan. Numerical Large Eddy Simulation of Flow around Square Cylinder [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2005, 27 (1): 27 - 31.
- [9] SARWAR M W, ISHIHARA T, SHIMADA K, et al. Prediction of Aerodynamic Characteristics of a Box Girder Bridge Section Using the LES Turbulence Model [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96 (10/11): 1895 - 1911.
- [10] SELVAM R P, BOSCH H, JOSHI R. Comparison of 2D and 3D CFD Modeling of Bridge Aerodynamics [C] // The 5th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, North Carolina: [s. n.], 2010: 23 - 27.
- [11] 陈艾荣, 艾辉林. 计算桥梁空气动力学: 大涡模拟 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
CHEN Airong, AI Huilin. Computational Bridge Aerodynamics: Large Eddy Simulation [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.

• 更正 •

《公路交通科技》2011年第28卷,第10期(总第189期)的封底“Vol. 28 No. 9 (189)”有误,应为“Vol. 28 No. 10 (189)”。

特此更正。

本刊编辑部