

文章编号:1671-8879(2009)02-0056-04

粗糙度对雷诺数效应的影响

李加武, 崔欣, 张宏杰, 刘建新

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为了研究粗糙度对流线型桥梁断面雷诺数效应的影响,以及将表面粗糙度作为气动措施用于减小该类型桥梁断面雷诺数效应的可能性,利用风洞试验,在模型表面粘贴不同粒径的砂纸,改变模型表面粗糙度,测量了不同雷诺数下以及 3 种不同粗糙表面的流线型桥梁断面模型的三分力系数及表面压力。研究表明:流线型桥梁断面即使在较窄的雷诺数范围内也具有较明显的雷诺数效应;表面粗糙度对三分力系数的雷诺数效应具有一定的抑制作用。

关键词:桥梁工程;雷诺数效应;风洞试验;三分力系数;表面压力

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

Influence of surface roughness on Reynolds number effects

LI Jia-wu, CUI Xin, ZHANG Hong-jie, LIU Jian-xin

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the influence of surface roughness on Reynolds number effects of bridge deck section and investigate the approach of increasing surface roughness to reduce the Reynolds number effect, several models with different surface roughness were tested in wind tunnel. The surface roughness of model was altered by gluing different kinds of sand paper on the model surface. Based on the smooth and rough surface model of stream-line bridge deck, the investigation into Reynolds number effects of static aerodynamic force coefficients and pressure coefficients were carried out in CA-1 wind tunnel. The research results indicate that the Reynolds number effects of stream-line bridge deck are considerable even in narrow range of the Reynolds number. The surface roughness could be served as a method mitigating Reynolds number effects. Therefore, the test results show that the Reynolds number effects of stream line bridge deck can be minimized by increasing surface roughness. 10 figs, 10 refs.

Key words: bridge engineering; Reynolds number effect; wind tunnel test; static coefficient; surface pressure

0 引言

在桥梁抗风研究中,三分力系数是抖振响应分析、驰振稳定性分析以及静风荷载和稳定性分析中

的重要参数。三分力系数的取值直接影响桥梁抗风分析的精度。20 世纪 80 年代, Schewe^[1]在压力风洞中对圆柱的雷诺数进行研究,后来又对 H 型断面与桥梁断面进行研究,发现雷诺数效应在这些断面

收稿日期:2008-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(50578014)

作者简介:李加武(1972-),男,安徽舒城人,副教授,工学博士, E-mail:ljw@gl.chd.edu.cn.

中也不同程度的存在,但当时没能引起足够重视;最近, Schewe^[2]通过对机翼、圆柱和桥梁断面(大海带桥引桥)尾迹区形状随雷诺数变化的研究认为,雷诺数对三分力的影响体现在其对尾流形状的影响; Barre^[3]等测量 Normandi 桥断面的3个模型(缩尺分别为1:10、1:50、1:100)三分力时发现,它们的三分力系数曲线不重合,归结为雷诺数效应。目前,中国常采用的风洞均为低速风洞,低速风洞试验中雷诺数 Re 相似条件难以满足,从而使试验值与实桥值之间存在雷诺数效应。因此,进行三分力系数的雷诺数效应抑制措施的研究对提高桥梁抗风分析有着重要的意义。为此,本文在雷诺数 $Re = 6.0 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^5$ 范围内测量了宽高比为10:1光滑表面及3种不同粗糙度流线型桥梁断面的三分力和表面压力,研究了三分力系数及压力系数随雷诺数的变化规律,并研究了表面粗糙度对雷诺数效应的影响。

1 试验内容

试验在长安大学 CA-1 风洞中进行,风洞试验段长15 m,宽3 m,高2.5 m;风速0~53 m/s 连续可调,均匀场紊流度小于0.3%。测力均采用的是杆式天平测力系统,该测力系统由2个五分力杆式应变天平、供桥直流稳压电源数据采集和分析系统组成。试验模型由两侧杆式天平水平支撑,天平的根部与迎角变换机构相连,以变换气流攻角。该天平阻力方向最大量程为200 N,升力方向为400 N,升力矩为100 N·m。

试验模型采用流线型断面,宽高比为10:1。模型骨架及外表均由优质木材制作,在模型表面粘贴即时胶模拟光滑表面,在表面粘贴不同标号的砂纸来模拟不同的粗糙度。本次试验共采用3种不同粗糙程度的砂纸,标号分别是60目、100目和150目^[4]。在模型的1/2长度处设置测压孔,孔间距为3 cm,风嘴处间距为0.7 cm,孔径为1 mm。模型在风洞中的安装如图1所示。流线型模型的梁高为60 mm,试验风速变化范围为5~35 m/s。

2 试验结果

2.1 阻力系数

图2为流线型断面阻力系数(C_D)的雷诺数效应曲线。从图2可以看出:①阻力系数随雷诺数的增加呈下降趋势;②在低雷诺数区($Re < 6.0 \times 10^4$), C_D 减小幅度比高雷诺数区缓慢,在 $Re = 1.0 \times 10^5$

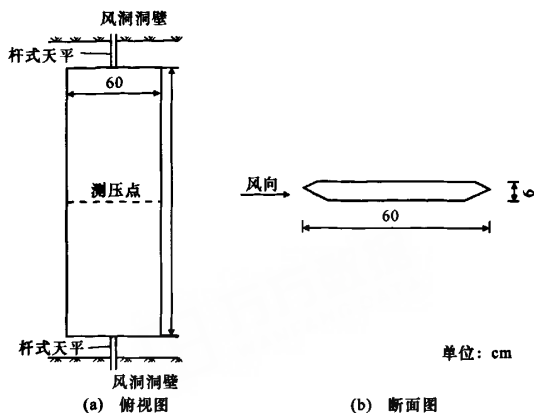


图1 试验模型在风洞中的安装

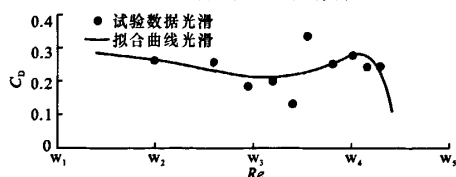


图2 流线型断面阻力系数的雷诺数效应曲线

注: $w_1 = 3 \times 10^3$; $w_2 = 10^4$; $w_3 = 3 \times 10^4$; $w_4 = 10^5$; $w_5 = 3 \times 10^5$

小范围内,阻力系数出现小波动,越过 $Re = 1.0 \times 10^5$ 以后,阻力系数下降的速度明显加快,即可以认为其进入临界区^[5]。

2.2 升力系数

图3为流线型断面升力系数(C_L)的雷诺数效应曲线。从图3可看出:①升力系数随雷诺数的增加呈下降趋势;②在低雷诺数区($Re < 4.0 \times 10^4$), C_L 减小幅度比高雷诺数区缓慢,越过 $Re = 4.0 \times 10^4$ 以后,升力系数出现回升,随之继续下降,并且下降速度明显加快。

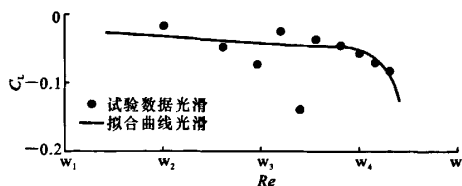


图3 流线型断面升力系数的雷诺数效应曲线

2.3 升力矩系数

图4(见下页)为升力矩系数(C_M)的雷诺数效应曲线。从图4可以看出:雷诺数 Re 在 $1.0 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^5$ 时, C_M 随雷诺数 Re 呈先下降后上升的趋势,并且上升速率明显高于下降速率,但是其值的变化范围不显著。

2.4 表面压力系数

图5(见下页)为模型表面测点的分布(图中数

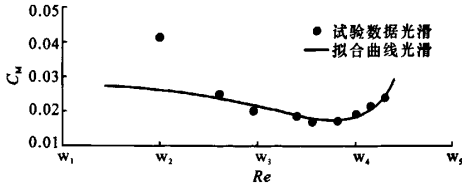


图4 流线型断面升力矩系数的雷诺数效应曲线

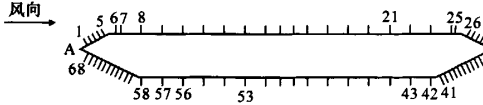


图5 模型表面测点的分布

字为测压孔编号);图6为不同雷诺数下的表面压力分布。图6中压力系数的符号规定为:在断面轮廓线以外为正,以内为负。

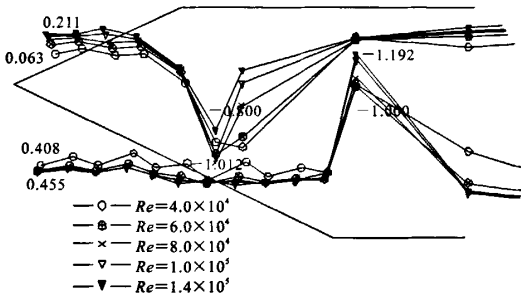


图6 雷诺数对流线型桥梁断面压力的影响

2.4.1 下表面压力分布

由图6可知,下表面从点68的压力系数 $C_p = 0.45$ 向下游逐渐减小,直到 $C_p = 0$,可见在不同雷诺数下 $C_p = 0$ 的位置不变,之后 C_p 继续迅速减小,直至点57时, C_p 达到最小值。在不同雷诺数下点57的压力都达到最小值,但是该点的压力值却随着雷诺数的增加而减小,从点68开始,直到点57处,压力一直是减小的。

在点57后,压力迅速回升。点56以后压力恢复变缓,压力继续增加,直到点53,压力增加结束。自点53到点43,同一雷诺数下压力保持不变,但其压力系数随雷诺数的增大而增大。从点43到点41区域压力减小,气流加速,但比迎风面的压力变化小,由此表明,该区气流有微弱再附。

2.4.2 上表面压力分布

由图6可知,上表面压力系数 $C_p = 0$ 出现的位置比下表面出现的位置要早,并且此位置比下表面对雷诺数敏感,随雷诺数增加此位置向下游推移,同时最小压力系数出现位置也比下表面最小压力系数出现位置靠前,其绝对值也比下表面小得多。在点21处压力开始缓慢减小,最终维持在 -0.2 水平上,

没有明显突变。由此可见,上表面的压力分布与下表面压力特性有明显的不同。总之,由流线型断面表面压力分布可以得出,雷诺数对表面压力分布影响体现在:对上下表面的最小压力系数、背压系数大小的影响;对零压力出现的位置、分离后压力系数大小的影响;对背压区范围的影响^[6]。

2.5 脉动压力系数

图7(见下页)为不同雷诺数下的表面脉动压力分布^[7-9]。从图7可以看出:①脉动压力系数沿表面的分布比压力系数简单得多;②沿表面分布的脉动压力随雷诺数的增加而减小,且波动幅度也随着雷诺数的增加而减小;③在低雷诺数区($Re \leq 4.0 \times 10^4$)时,脉动压力系数最大值分别在上下表面的点8和点56,随雷诺数增大, $Re = 1.0 \times 10^5$ 时,最大值分别出现在点7和点57,即雷诺数增加,脉动压力系数的最大值向上游移动;④雷诺数 $Re \geq 1.0 \times 10^5$ 以后,脉动压力对雷诺数不敏感,而且在整个表面上,脉动压力系数趋于相同。

3 粗糙度对三分力系数雷诺数效应的影响

在裸梁模型表面包裹砂纸,模拟粗糙表面,通过改变包裹不同型号砂纸来改变试验模型的表面粗糙度^[10]。本文试验共采用3种型号的砂纸,标号分别是60目、100目和150目(记为 R_1 、 R_2 和 R_3 ,分别对应图中粗糙1、粗糙2和粗糙3),随着砂纸标号的增加粗糙度逐渐降低。

3.1 粗糙度对阻力系数的影响

图8(见下页)为粗糙度对阻力系数(C_D)的雷诺数效应曲线。从图8可见:①引入粗糙表面,减小了 C_D-Re 曲线的波动,减缓了 C_D-Re 雷诺数曲线骤变的趋势;②在低雷诺数区提高表面粗糙度,放大了阻力系数;③在 $Re = 5.0 \times 10^4$ 附近,3个粗糙度测得的阻力系数相近,即粗糙度对阻力系数的影响较小;④粗糙度的引入使得 C_D-Re 曲线从亚临界区进入临界区较晚,即延长了亚临界区域;⑤粗糙表面在 $Re > 5.0 \times 10^4$ 后, C_D-Re 曲线的减小速率变缓,并且粗糙度越大,曲线的下降速率就越缓和;⑥粗糙程度越大, C_D-Re 曲线就越平稳。

3.2 粗糙度对升力系数的影响

图9(见下页)为粗糙度对升力系数(C_L)的雷诺数效应曲线。从图9可见:①粗糙表面的引入,减少了升力系数随雷诺数的波动;②粗糙度对升力系数

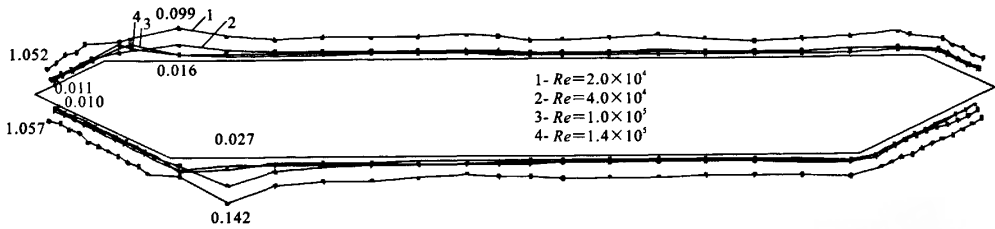


图 7 雷诺数对流线型桥梁断面的脉动压力系数的影响

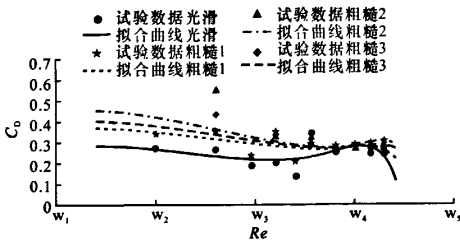


图 8 粗糙度对阻力系数的雷诺数效应的影响

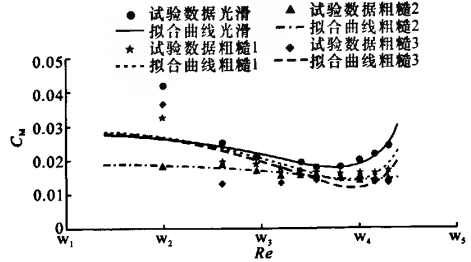


图 10 粗糙度对升力矩系数的雷诺数效应的影响

的影响要比阻力系数复杂;③升力系数与雷诺数的变化规律对粗糙度有一定的依赖性,粗糙度 R_1 、 R_2 没有改变升力系数特性,仅使其对雷诺数的敏感性减小,但粗糙度 R_3 却使升力系数对雷诺数的关系与光滑表面相反;④因试验条件所限,雷诺数仅达到 $Re = 1.4 \times 10^5$, 未将曲线向更高雷诺数区域延伸,也未进一步研究升力系数随雷诺数的复杂变化。

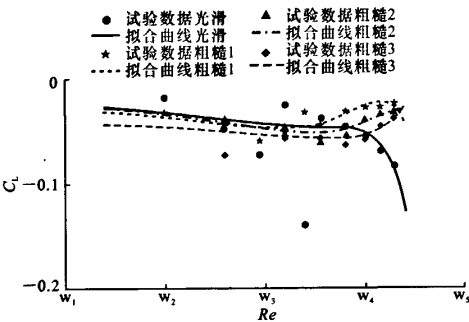


图 9 粗糙度对升力系数的雷诺数效应的影响

3.3 粗糙度对升力矩系数的影响

虽然升力矩系数随雷诺数变化的范围不是很大,但为研究粗糙表面对雷诺数效应的影响,还是对其进行了研究。图 10 为流线型桥梁断面模型的升力矩系数(C_M)的雷诺数效应曲线。从图 10 可见:①粗糙度减小了升力矩系数;②粗糙度的引入,没有改变升力矩系数随雷诺数的变化规律;③升力矩系数对粗糙度较敏感,较之粗糙度 R_1 、 R_3 来说, R_2 使 C_M-Re 曲线更加平稳,减小了升力矩系数的波动, R_2 是介于 R_1 和 R_3 之间的一种粗糙度,可见,合适的粗糙程度对升力矩系数随雷诺数的波动具有更好的控制作用。

4 结 语

(1)流线型桥梁断面,阻力系数和升力系数存在雷诺数效应;雷诺数对表面压力有影响,且可能导致静力三分力系数随雷诺数变化。

(2)粗糙度减小了流线型桥梁断面阻力系数、升力系数和升力矩系数的波动。

(3)阻力系数与雷诺数的关系曲线对粗糙度种类不敏感;升力系数及升力矩系数对雷诺数的敏感转嫁于对粗糙度的敏感。

(4)在当前还没有更理想的方法来有效控制桥梁测力试验中的雷诺数效应的情况下,建议适当增加表面粗糙度来减小雷诺数效应。

参考文献:

References:

- [1] Schewe G. On the force fluctuations acting on a circular cylinder in cross flow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 133: 265-285.
- [2] Schewe G. Reynolds-number effects in flow around more-or-less bluff bodies[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 2001, 89 (14/15): 1267-1289.
- [3] Barre C, Barnaud G. High Reynolds number simulation techniques and their application to shaped structures model test[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 57(2/3): 145-157.

(下转第 64 页)

- Chang'an University, Natural Science Edition, 2004, 24(1):34-39.
- [2] 贺拴海,赵小星,宋一凡,等.具有初荷载的钢筋混凝土梁桥粘贴碳纤维布加固试验研究[J].土木工程学报,2005,38(3):70-76.
HE Shuan-hai,ZHAO Xiao-xing,SONG Yi-fan,et al. An experimental study on research of reinforced concrete beam bridges rehabilitated with CFRP laminates under loading and unloading conditions[J]. China Civil Engineering Journal,2005,38(3):70-76.
- [3] 任伟,赵煜,栾好发.钢板加固持荷 RC 梁承载力数值分析方法[J].交通运输工程学报,2007,7(6):96-100.
REN Wei,ZHAO Yu,LUAN Hao-fa. Numerical method of bearing capacity for preloaded RC beam strengthened by bonded steel plates[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2007,7(6):96-100.
- [4] 任伟,贺拴海,赵小星,等.黏贴钢板加固持荷钢筋混凝土 T 型梁模型试验[J].中国公路学报,2008,21(3):64-68.
REN Wei,HE Shuan-hai,ZHAO Xiao-xing,et al. Model test on preloaded RC T-beam strengthened by bonded steel plates[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(3):64-68.
- [5] Chen J F,Teng J G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete[J]. Journal of Structural Engineering,2001,127(7):784-791.
- [6] 卜良桃,宋力,施楚贤.碳纤维板加固钢筋混凝土梁的抗弯试验和理论研究[J].建筑结构学报,2007,28(1):72-79.
BU Liang-tao,SONG Li,SHI Chu-xian. Experimental and theoretical study on flexural behavior of RC beams strengthened with carbon fiber plates (CFP) [J]. Journal of Building Structures,2007,28(1):72-79.
- [7] 武同乐,徐岳.公路旧桥加固效果综合评价方法[J].交通运输工程学报,2005,5(1):28-32.
WU Tong-le,XU Yue. Comprehensive evaluation method of bridge strengthening effectiveness [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2005,5(1):28-32.
- [8] CECS 146:2003,碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程[S].
- [9] GB 50367—2006,混凝土结构加固设计规范[S].
- [10] 高轩能,周期源,陈明华.粘钢加固 RC 梁承载性能的理论 and 试验研究[J].土木工程学报,2006,39(8):38-44.
GAO Xuan-neng,ZHOU Qi-yuan,CHEN Ming-hua. Theoretical and experimental research on bearing behavior of RC beams strengthened by bonded steel plates[J]. China Civil Engineering Journal,2006,39(8):38-44.
- [11] 李德寅.结构模型实验[M].北京:科学出版社,1996.
-
- (上接第 59 页)
- [4] BS 871—1981,砂纸和砂布规范[S].
- [5] Jose L D R. Fluctuating lift and its span-wise correlation on a circular cylinder in a smooth and in a turbulent flow; a critical review[J]. Journal of Wind Engineer and Industrial Aerodynamics,1992,40(2):179-198.
- [6] 李加武,林志兴,项海帆.桥梁断面三分力系数的雷诺数效应[J].同济大学学报:自然科学版,2004,32(10):1328-1333.
LI Jia-wu,LIN Zhi-xing,XIANG Hai-fan. Reynolds number effect of mean force coefficient of two kinds of typical bridge deck section[J]. Journal of Tongji University, Natural Science,2004,32(10):1328-1333.
- [7] 刘健新.桥梁对风反应中的涡激振动及制振[J].中国公路学报,1995,8(2):74-79.
LIU Jian-xin. Vortex-induced vibration and its control in responses of bridge to wind[J]. China Journal of Highway and Transport,1995,8(2):74-79.
- [8] 周立,葛耀君.上海长江大桥桥节段模型气动三分力试验[J].中国公路学报,2007,20(5):48-53.
ZHOU Li,GE Yao-jun. Experiment on three-component of aerodynamic force of sectional model for Shanghai Yangtze river bridge[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(5):48-53.
- [9] 胡庆安,乔云强,刘健新,等.斜风作用下桥塔施工阶段抖振性能[J].交通运输工程学报,2008,8(2):40-43.
HU Qing-an,QIAO Yun-qiang,LIU Jian-Xin,et al. Buffeting performance of bridge tower under yawed wind during construction[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2008,8(2):40-43.
- [10] 王铁成.空气动力学实验技术[M].北京:航空工业出版社,1995.