

圆角矩形柱平均气动力特性的雷诺数效应试验研究

于畅¹, 仇法梅¹, 田学东¹, 杨群^{1,2,3}, 刘小兵^{1,2,3}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心, 河北 石家庄 050043;

3. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要:针对宽厚比为2、圆角率为0.3的矩形柱,采用刚性模型测压风洞试验的方法,在均匀流场中对其表面风压时程在不同雷诺数和不同风向角下进行了测试。分析了不同风向角下平均阻力系数、平均升力系数和平均风压系数随雷诺数的变化规律。结果表明,随着雷诺数的增大,平均阻力系数减小,平均升力系数会产生明显的跳跃现象。迎风侧角点的风吸力会在较高雷诺数时产生明显的突增现象,随着风向角的增大,突增幅度先增大后减小。

关键词:圆角矩形柱;平均气动力特性;风向角;雷诺数;风洞试验

中图分类号: TU973 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)02-0029-06

0 引言

近年来,随着建筑材料和技术的不断突破创新,工程结构也在不断地向着更高、更长和低阻尼方向发展,这使得结构的抗风设计变得更加重要。高层建筑、桥塔和一些高耸结构的断面形式多为矩形,为改善结构的气动特性,对矩形柱进行圆角化处理是目前一种比较常见的气动措施^[1-3]。根据目前的研究结果来看,对矩形柱圆角化处理后,结构带有曲面,气动特性的雷诺数效应问题不容忽视^[4-6]。

目前已有一些学者对矩形柱的气动特性展开了一定的研究。杜晓庆等^[7]通过数值模拟的方法研究了宽厚比为1~4矩形柱的绕流特征,发现宽厚比为3和4矩形柱的分离剪切层会发生再附,在侧面形成分离泡,导致平均阻力系数下降。刘喆等^[8]通过试验和数值模拟的方法对宽厚比为3矩形柱的尾流稳定性进行了研究。结果表明,当雷诺数接近临界值时,矩形柱尾流在未扰动时呈二维定常状态。王新荣等^[9-10]通过风洞试验测试了5种宽厚比的矩形柱表面风压分布规律,发现各模型表面风压分布均受雷诺数影响,不同宽厚比模型受雷诺数影响程度不同。后又针对宽厚比为2、圆角率为0、0.05、0.1、0.15的矩形柱的气动特性在0°风向角不同雷诺数下展开了研究。结果表明,随着圆角率的增大,模型的平均阻力系数减小,且平均阻力系数对雷诺数越来越敏感;所有模型的脉动升/阻力系数都出现了明显的雷诺数效应,且模型的圆角率越大,其脉动升/阻力系数对雷诺数越敏感。王伟等^[11]采用大涡模拟的方法对不同风向角下的宽厚比为2矩形柱进行了研究。研究发现,矩形柱气动特性对风向角非常敏感,尤其在6°和67°附近区域。DELANY et al^[12]在0°风向角下雷诺数 $10^4 \leq Re \leq 3 \times 10^6$ 范围内研究了宽厚比为2、圆角率为0.042和0.167的圆角矩形柱的阻力系数变化规律。研究可见,圆角率为0.042时,雷诺数 $Re \leq 1 \times 10^6$ 时,平均阻力系数随雷诺数变化不大,之后随着雷诺数的增加,平均阻力系数先增大后减小;圆角率为0.167时,平均阻力系数在 $Re \leq 8 \times 10^5$ 变化较小,之后随雷诺数的增大先减小后增大,且最大值高于低雷诺数时的平均值。

根据上述文献可知,目前对矩形柱气动特性的研究多针对标准矩形柱,对圆角矩形柱的研究较少,在圆角矩形柱气动力特性的雷诺数效应的研究多集中在0°风向角。从已有的标准矩形柱的研究结果不难看出,

收稿日期:2023-03-11 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20230055

基金项目:国家自然科学基金(52008273, 52078313);河北省自然科学基金(E2020210083);石家庄铁道大学研究生创新资助项目(YC2023074, YC2023062)

作者简介:于畅(1998—),男,硕士研究生,研究方向为工程结构的风荷载与风致振动研究。E-mail:yu241x@163.com

于畅,仇法梅,田学东,等.圆角矩形柱平均气动力特性的雷诺数效应试验研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(2):29-34.

风向角是影响气动力特性的一个关键因素,因此有必要深入研究风向角对圆角矩形柱气动力特性的雷诺数效应的影响。鉴于此,采用风洞试验的方法,对宽厚比为 2 的圆角矩形柱在不同的雷诺数以及不同风向角下的气动力特性展开了研究。限于篇幅,主要对其平均升/阻力及平均风压开展了深入分析。

1 风洞试验介绍

1.1 试验模型与装置介绍

试验在石家庄铁道大学 STDU-1 风洞实验室高速试验段进行,其宽为 2.2 m,高 2.0 m,长 5.0 m。试验在低湍流度的均匀流场中进行,速度场不均匀性小于 0.5%,背景湍流度小于 0.5%。

试验为刚性模型测压试验。图 1 为模型截面尺寸、测点布置及风向角示意。模型截面厚度 $D = 120$ mm,宽度 $B = 240$ mm,圆角半径 $R = 36$ mm,圆角率 $R/D = 0.3$,宽厚比 $B/D = 2$ 。在模型跨中位置沿周向布置一圈测点,共 72 个测点,其中截面直线段测点间距最大为 10 mm,最小为 9.6 mm,圆弧段测点间距均为 8.1 mm。测点风压通过电子压力扫描阀采集,其采样频率为 330 Hz,采样时间 30 s,采样点数 9 900 个。为满足风洞试验阻塞度要求,风向角 α 的变化范围为 $0^\circ \sim 25^\circ$,变化间隔为 2.5° 。图 2 为模型安装示意。模型长度 $L = 1\ 700$ mm,采用 ABS 板制作,并对表面进行喷漆处理,经粗糙度测量仪对模型表面不同位置进行测试,其平均粗糙度在 $1.3 \sim 2.9\ \mu\text{m}$ 之间。模型支撑于风洞中间位置,在模型中央设置通长的实心钢棒,以保证模型具有足够的强度和刚度。试验照片如图 3 所示。通过对模型两端设置端板来保证绕流的二维性^[13],参考文献[14]的研究成果,端板由半径为 550 mm 的半圆和 $1\ 120\ \text{mm} \times 1\ 100\ \text{mm}$ 的矩形组成,如图 4 所示。

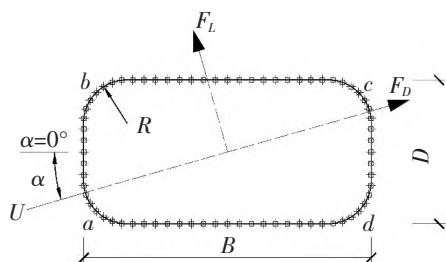


图 1 模型截面尺寸、测点布置及风向角示意

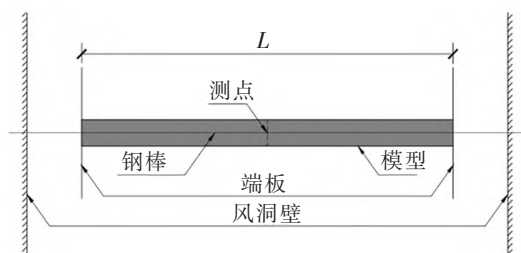


图 2 模型安装示意



图 3 试验照片

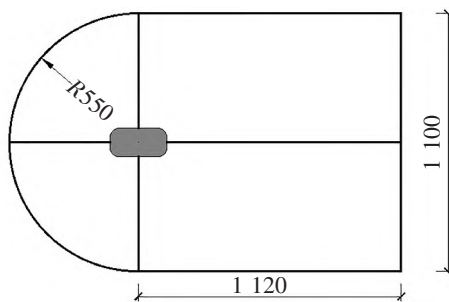


图 4 端板尺寸(单位:mm)

1.2 参数定义

雷诺数 Re 的计算公式为

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (1)$$

式中, U 为来流风速,本试验通过眼镜蛇风速仪测得,风速变化范围为 $9 \sim 43\ \text{m/s}$; D 为特征尺寸,在此取断面厚度 120 mm; ν 为空气运动黏性系数,是黏度系数 μ 与空气密度 ρ 的比值。由此计算本试验的雷诺数范围为 $0.8 \times 10^5 \sim 3.6 \times 10^5$ 。

风压分布可以用无量纲参数风压系数 $C_p(i)$ 表示,其定义为

$$C_P(i) = \frac{P_i - P_s}{0.5\rho U^2} \quad (2)$$

式中, P_i 为模型表面某测点处测得的瞬时压力信号; P_s 为参考点处的静压值; ρ 为空气密度。平均风压系数 C_{P_mean} 用风压系数时程的均值表示。

气动力可由无量纲参数阻力系数 $C_D(i)$ 、升力系数 $C_L(i)$ 来表示, 其定义如下

$$C_D(i) = \frac{F_D(i)}{0.5\rho U^2 D} \quad (3)$$

$$C_L(i) = \frac{F_L(i)}{0.5\rho U^2 B} \quad (4)$$

式中, $F_D(i)$ 为矩形柱上各测点压力积分得到的单位长度上顺风向阻力时程; $F_L(i)$ 为矩形柱上各测点压力积分得到的单位长度上横风向升力时程。平均阻力系数 C_{D_mean} 和平均升力系数 C_{L_mean} 分别用阻力系数时程和升力系数时程的均值来表示。

1.3 试验结果可靠性验证

为验证试验结果的可靠性, 首先对 0° 风向角下宽厚比为 2 的标准矩形柱进行刚性模型测压试验。表 1 为本试验得到的结果与已有的研究成果进行的对比。可以看出, 本文试验结果与既有文献结果吻合较好, 可以说明本文试验结果具有一定的可靠性。

表 1 0° 风向角下宽厚比为 2 的标准矩形柱研究结果对比

数据来源	研究方法	Re	C_{D_mean}	St
本文	风洞试验	$0.8 \times 10^5 \sim 3.6 \times 10^5$	1.56~1.59	0.08
文献[10]	风洞试验	$1.3 \times 10^5 \sim 6.5 \times 10^5$	1.49~1.68	0.08
文献[15]	数值模拟	6.85×10^5	1.51	0.08

2 试验结果分析

2.1 平均升/阻力系数的雷诺数效应分析

图 5 为不同风向角下模型平均阻力系数随雷诺数的变化曲线。由图 5 可知, 在试验雷诺数范围内, 模型的平均阻力系数在各风向角下均表现出了较为明显的雷诺数效应。具体而言, 在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 风向角范围内, 平均阻力系数先是随雷诺数增加逐渐减小, 到达一定雷诺数后, 其值均稳定在 0.42 左右。在 $7.5^\circ \sim 15^\circ$ 风向角时, 平均阻力系数随雷诺数增加而逐渐减小, 特别的是在 10° 和 12.5° 风向角下, 当雷诺数 Re 增加到 3.4×10^5 之后, 平均阻力系数减小程度较之前更为明显。 17.5° 和 20° 风向角下的平均阻力系数随雷诺数增加均表现为先有所增大, 在之后的一定雷诺数范围内逐渐减小, 到达一定雷诺数后又有所增大, 最终又减小的现象, 其值分别在 1.20~1.69 和 1.32~1.99 内变化。 22.5° 和 25° 风向角下平均阻力系数随雷诺数增加的变化规律基本一致, 均表现为随雷诺数增加先基本不变, 随后略有增大, 最后逐渐减小的规律, 其值分别在 1.49~2.20 和 1.86~2.31 内变化。

图 6 为不同风向角下模型平均升力系数随雷诺数的变化曲线。由图 6 可见, 在 0° 风向角时, 由于模型的对称性, 平均升力系数稳定在 0 附近, 且在试验雷诺数

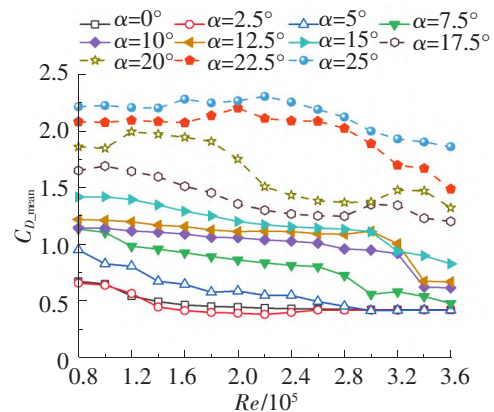


图 5 不同风向角下平均阻力系数随雷诺数变化曲线

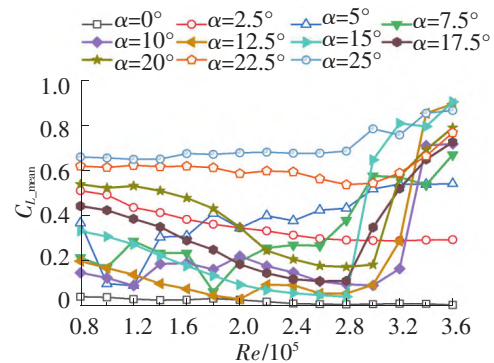


图 6 不同风向角下平均升力系数随雷诺数变化曲线

范围内基本保持不变。2.5°风向角时,平均升力系数随雷诺数的增加而减小,其值从 0.53 减小至 0.29 左右。5°风向角时,在 $0.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.2 \times 10^5$ 时,升力系数均值随雷诺数的增加逐渐减小,从 0.49 减小至 0.09,在之后的雷诺数范围内整体为增大的趋势,最终增长至 0.54 左右。7.5°风向角时,平均升力系数在 $Re = 1.8 \times 10^5$ 时取得最小值 0.06,之后随雷诺数的增大整体呈增大趋势,最终其值达到 0.67 左右。10°风向角时,平均升力系数在小雷诺数时,随雷诺数增加呈先减小后增加再减小趋势,当雷诺数达到 $Re = 3.2 \times 10^5$ 之后,产生明显的跳跃现象,其值跃升到 0.72 左右。12.5°~20°风向角范围内,平均升力系数整体表现为随雷诺数增加先减小后出现明显跳跃的变化规律,其值分别最终跃升至 0.9、0.9、0.73、0.79。22.5°~25°风向角范围内,平均升力系数随雷诺数增加先保持稳定后产生较为明显的增加现象,分别由 0.6 增长到 0.77 左右和 0.67 增长到 0.87 左右。

2.2 平均风压系数的雷诺数效应分析

图 7 为 0°风向角下模型平均风压系数随雷诺数的变化。由图 7 可见,在 0°风向角时,平均风压系数在各雷诺数下均展现了良好的对称性,在迎风侧 ab 的平均风压系数随雷诺数增加基本保持不变,背风侧 cd 的平均风压系数绝对值在 1.2×10^5 时出现较为明显的减小现象,在这之前和之后的雷诺数范围内变化不大,这是其阻力系数减小的主要原因。模型两侧面的较强负压区随雷诺数的增大逐渐向迎风面两圆角处集中,并且负压强度随雷诺数增加先增大后保持相对稳定。

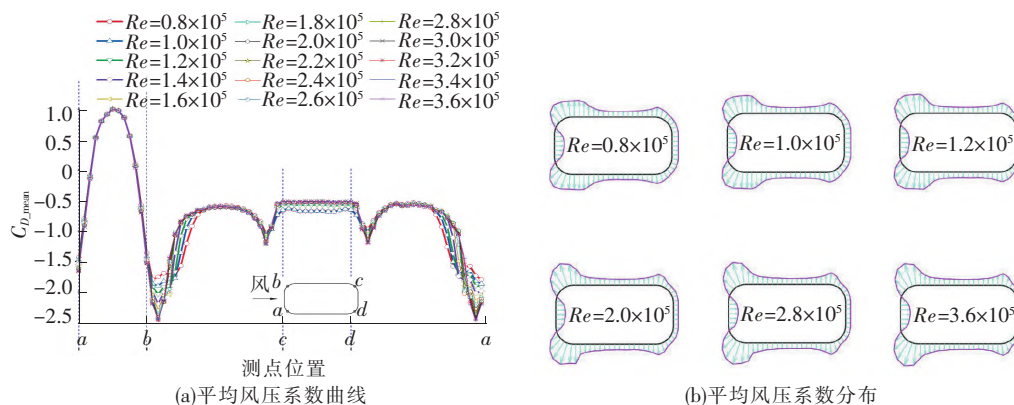


图 7 0°风向角下圆角矩形柱平均风压系数随雷诺数的变化

图 8 为 15°风向角下模型平均风压系数随雷诺数的变化。由图 8 可见,当雷诺数 $Re \leq 2.8 \times 10^5$ 时,模型各面平均风压系数随雷诺数变化不大,仅在圆角 d 附近,负压强度随雷诺数的增加产生较小的增大。当雷诺数增加至 3.0×10^5 时, bc 面负压强度较之前有明显增大,随着雷诺数继续增大, bc 面的强负压逐渐向圆角 b 附近集中,负压强度产生明显增大,且随雷诺数增加逐渐增大,圆角 b 处较大的压力变化是其平均升力系数产生跳跃的主要原因。

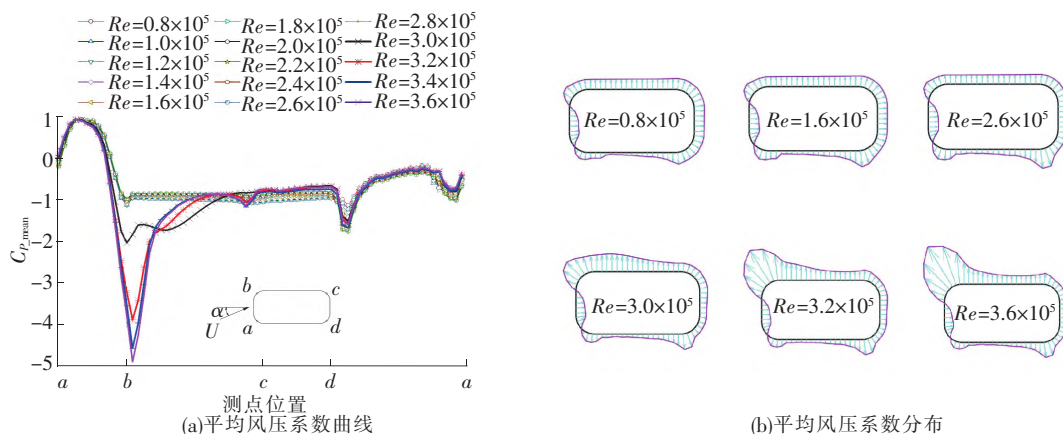


图 8 15°风向角下圆角矩形柱平均风压系数随雷诺数的变化

图 9 为 25°风向角下模型平均风压系数随雷诺数的变化。由图 9 可见,平均风压系数随雷诺数的变

化规律较 15° 风向角下类似,只是变化幅度相对减小很多。当雷诺数 $Re \leq 2.8 \times 10^5$ 时,模型各面平均风压系数随雷诺数变化不大,随着雷诺数继续增大, cd 面负压强度减小后保持相对稳定,圆角 b 附近的负压强度有所增加,且强负压范围逐渐由 b 点附近向 c 点扩展, b 点负压强度的增大以及 cd 面负压强度的减小,导致在较高雷诺数下此风向角时的平均阻力系数减小和平均升力系数增大。

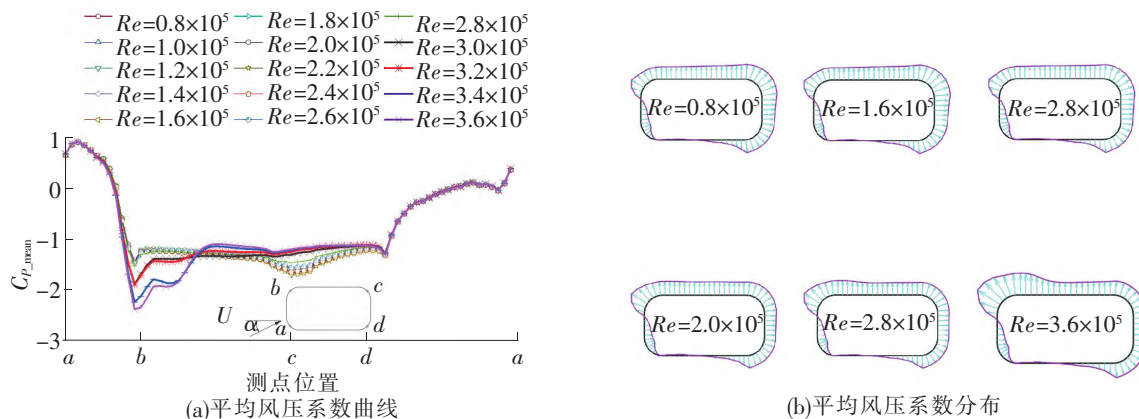


图9 25° 风向角下圆角矩形柱平均风压系数随雷诺数的变化

3 结论

基于模型风洞试验的方法,研究了宽厚比为2、圆角率为0.3的矩形柱在不同雷诺数($0.8 \times 10^5 \sim 3.6 \times 10^5$)和不同风向角($0^\circ \sim 25^\circ$)下的平均气动力特性,得到了以下几点结论:

(1) 圆角矩形柱平均升/阻力系数在试验风向角范围内均产生了较为明显的雷诺数效应。平均阻力系数整体表现为随雷诺数的增大而减小。平均升力系数在 $7.5^\circ \sim 20^\circ$ 风向角下在较高雷诺数时产生了明显的跳跃现象。

(2) 不同风向角下,圆角矩形柱平均风压系数在低雷诺数时变化不明显。当雷诺数增加到一定数值后,迎风侧角点处的风吸力会产生突然增大的现象,且增大幅度随风向角增大先增大后减小,平均风压系数的最大绝对值为4.9左右,对应的风向角为 15° ,雷诺数为 3.6×10^5 。

参 考 文 献

- [1] 姚世传,施鑫鑫,郭鹏. 前缘倒圆角方柱绕流的大涡模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2018, 33(4): 522-529.
- [2] MARIE S T, JENS C B, STEFANO C, et al. Towards a standard CFD setup for wind load assessment of high-rise buildings: Part 2-Blind test of chamfered and rounded corner high-rise buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 205(1): 1-14.
- [3] 刘帅永. 倒角和切角措施对方柱表面风荷载影响的大涡模拟研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020.
- [4] 顾明,王新荣. 工程结构雷诺数效应的研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 961-969.
- [5] 张志君,李天歌,司腾飞,等. 低雷诺数下椭圆翼型层流分离研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(12): 1753-1760.
- [6] 邱翔,吴昊东,陶亦舟,等. 近壁面圆柱绕流中尾流结构演化特性的实验研究[J]. 力学学报, 2022, 54(11): 3042-3057.
- [7] 杜晓庆,林伟群,代钦. 矩形柱体气动性能的流场机理研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(1): 51-58.
- [8] 刘喆,邵传平. 矩形柱二维尾流的稳定性研究[J]. 中国计量学院学报, 2012, 23(4): 346-352.
- [9] 王新荣,顾明,全涌. 低紊流度下二维矩形截面柱体模型表面风压分布的雷诺数效应[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 143-149.
- [10] 王新荣,顾明,全涌. 圆角处理的断面宽厚比为2:1的二维矩形柱体气动力系数的雷诺数效应研究[J]. 工程力学, 2016, 33(1): 64-71.
- [11] 王玮,曹曙阳. 不同攻角下2:1矩形截面棱柱绕流的大涡模拟研究[J]. 力学季刊, 2021, 42(2): 304-316.
- [12] DELANY N K, SORESENSEN N E. Low-speed drag of cylinders of various shapes[M]. Washington, D.C.: National Advisory Committee for Aeronautics, 1953.

- [13]郑云飞,刘庆宽,马文勇,等. 端板对二维矩形风洞试验模型气动特性的影响[J]. 实验流体力学, 2017, 31(3): 38-45.
- [14]KUBO Y, MIYAZAKI M. Effects of end plates and blockage of structural members on drag forces[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1989, 32(3): 329.
- [15]王书标,程文明,杜润,等. 超高雷诺数下矩形截面气动特性研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 1907-1914.

Experimental Study on Reynolds Number Effect of Mean Aerodynamic Force Characteristics of Rectangular Cylinder with Rounded Corner

Yu Chang¹, Qiu Famei¹, Tian Xuedong¹, Yang Qun^{1,2,3}, Liu Xiaobing^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Hebei Wind Engineering and Wind Energy Utilization Engineering
Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050043, China;

3. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures,
Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: For a rectangular cylinder with a rounded corner ratio of 0.3 and a width-thickness ratio of 2, the wind tunnel test method of rigid model was adopted to test the surface wind pressure time histories under different Reynolds numbers and different wind direction angles in a uniform flow field. The variation of mean drag coefficient, mean lift coefficient and mean wind pressure coefficient with Reynolds number under different wind direction angles was analyzed. The results show that with the increase of Reynolds number, the mean drag coefficient decreases, and the mean lift coefficient will produce obvious jump phenomenon. The wind suction at the windward corner increases obviously at a higher Reynolds number. As the wind direction angle increases, the amplitude of the increase first increases and then decreases.

Key words: rectangular cylinder with rounded corner; mean aerodynamic force characteristic; wind direction angle; Reynolds number; wind tunnel test

~~~~~  
(上接第 19 页)

## Fatigue Damage Analysis of Stay Cables Based on Fine Model

Han Jiahao, Li Yanqiang

(Department of Engineering Mechanics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In order to better predict the fatigue life of stay cables, a fatigue life analysis method of stay cables based on fine model was proposed. Firstly, the fatigue vulnerability index of stay cable was established based on the  $S-N$  curve, and the Monte-Carlo method was used to generate random train loads for vehicle bridge coupling analysis. The most vulnerable cable was obtained through the vulnerability analysis. Then, considering the cable force error of parallel steel strands, a fine stay cable model was established. Based on Miner's linear cumulative damage theory, fatigue damage analysis and life prediction of the fine model were carried out. The numerical simulation results show that the method can accurately determine the fatigue location and fatigue degree of each steel strand stay cable. The stay cable with large bridge cable force is prone to fatigue damage, and the fatigue damage mostly occurs in the anchorage section, and the fatigue damage degree of the outer steel strand is relatively large.

**Key words:** stay cable; fatigue analysis; life prediction; fine model