

不同风向角下宽厚比为 1 : 4 的矩形柱气动特性试验研究

范佳豪¹, 丰 斌¹, 姜会民¹, 刘小兵^{1,2,3}, 杨 群^{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:基于刚性模型测压风洞试验,分析了 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向角范围内宽厚比为 1 : 4 矩形柱的气动特性,得到了其风压系数、气动力系数和斯托罗哈数随风向角的变化规律。结果表明,平均阻力系数随着风向角的增大先减小后增大;平均升力系数的绝对值随着风向角的增大先增大后减小;平均扭矩系数分别在 α 为 55° 和 85° 时取得极小值和极大值。脉动气动力系数在 $\alpha\leq 25^{\circ}$ 时整体较 $\alpha>25^{\circ}$ 时大。斯托罗哈数在 α 为 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 和 $85^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时发生了突变现象。

关键词:矩形柱;气动特性;风向角;风洞试验

中图分类号:TU973 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2022)02-0032-07

矩形截面柱体在土木工程中具有广泛的应用背景,如高层建筑、桥墩、桥塔等。近些年来,随着土木工程建造水平的提高以及轻质高强材料的应用,这些结构或构件不断向轻柔化方向发展,导致其对风荷载越来越敏感,在风的作用下,极易发生风致振动,严重影响结构的舒适性和耐久性^[1-3]。开展对矩形柱气动特性的研究,获得用于风荷载取值及风致振动分析的气动力系数、风压系数和斯托罗哈数,对此类结构或构件的抗风设计有重要意义。已有学者对 5 : 1、10 : 1、2 : 1 和 1 : 1 宽厚比矩形柱的气动特性进行了一些研究。杨群等^[4]针对宽厚比为 5 : 1 的矩形柱进行了节段模型测压风洞试验,研究了其气动力系数随风向角的变化规律。结果表明,随着风向角由 0° 增加到 6° ,其平均阻力系数明显增大、平均升力系数缓慢增大、而斯托罗哈数则变化不明显。杨晶等^[5]对宽厚比为 10 : 1 的矩形柱进行了风洞试验研究。研究发现,平均风压系数和脉动风压系数与风向角紧密相关。王玮等^[6]以宽厚比为 2 : 1 的矩形柱为研究对象,进行了数值模拟研究。首先将特殊风向角下的数值模拟结果与风洞试验结果进行对比,验证了数值模拟结果的准确性与可靠性;然后给出了阻力系数、升力系数、斯托罗哈数随风向角的变化规律。结果表明,2 : 1 宽厚比矩形柱的气动力系数在风向角 6° 和 67° 附近变化十分剧烈。邓燕华等^[7]和刘小兵等^[8]分别通过数值模拟和风洞试验的方法研究了方柱的气动特性随风向角的变化规律。研究发现,平均阻力系数和平均升力系数在风向角 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 范围出现最小值,而斯托罗哈数则在此风向角范围内出现最大值。从以上研究中可以发现,风向角对矩形柱的气动特性影响显著,不同宽厚比矩形柱气动特性随风向角的变化规律有所不同。

从文献资料来看,目前关于 1 : 4 矩形柱气动特性的研究主要集中在 0° ^[9-10]和 90° ^[11-14]2 种特殊风向角下,且研究方法多为数值模拟。在实际工程中,来流风恰好与矩形边垂直或平行的情况很少,更为普遍的情况是来流与矩形边斜交,仅采用特定风向角下的气动特性对结构进行抗风设计可能偏于不安全。为

收稿日期:2022-02-10 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20220014

基金项目:国家自然科学基金(52008273,52078313);河北省自然科学基金(E2020210083);河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2019118)

作者简介:范佳豪(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:fjh15614413361@163.com

范佳豪,丰斌,姜会民,等.不同风向角下宽厚比为 1 : 4 的矩形柱气动特性试验研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(2): 32-38.

了更加全面、准确地掌握宽厚比为 1:4 的矩形柱的气动特性,通过刚性模型测压风洞试验,测试并分析了其风压系数、气动力系数和斯托罗哈数随风向角的变化规律。研究可为 1:4 宽厚比矩形截面柱体结构的抗风设计提供参考。

1 风洞试验介绍

1.1 风洞试验概况

试验在石家庄铁道大学大气边界层风洞实验室的低速试验段进行。低速试验段转盘中心处高 3 m,宽 4.38 m,总长为 24 m,空风洞湍流度小于 0.5%。图 1 为试验装置图,为了保证模型的二元性,在模型上下两端布置了 2 个直径为 2 m 的圆端面。模型上下两端通过旋转接头与风洞顶面铰接,模型下端通过支架与低速试验段转盘固接。可通过转动转盘来实现风向角的变化。

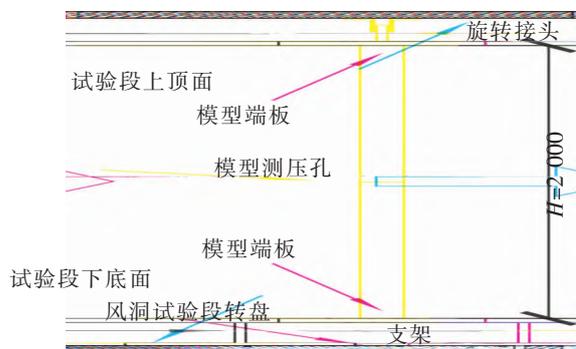


图 1 试验装置图(单位:mm)

图 2 为模型横断面测点布置、尺寸及风向角示意图。试验模型由 ABS 板材制作,模型高 $H=2\ 000$ mm,厚 $D=320$ mm,宽 $B=80$ mm。在模型中间位置沿周向布置 88 个测压点用于风压测量。由于流场在角点附近变化剧烈,因此在矩形柱 4 个角点附近对测压点进行加密处理。风洞中的试验模型如图 3 所示。风压通过电子压力扫描阀测得。电子压力扫描阀的采样频率为 330 Hz,采样时间为 30 s。

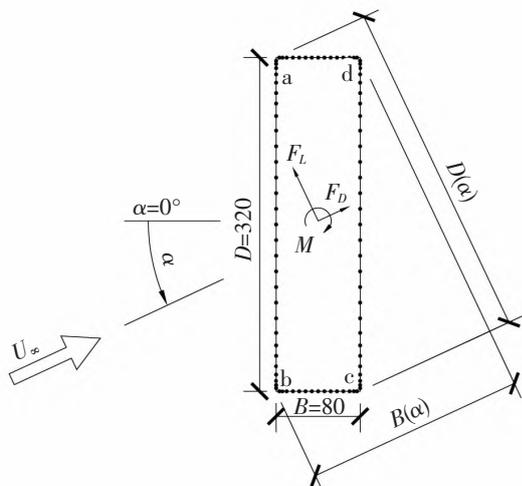


图 2 模型横断面测点布置、尺寸及风向角示意图(单位:mm)



图 3 试验模型

试验在均匀流场下进行,试验风速为 10 m/s。考虑到流场的对称性,试验风向角的变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$,每 5° 一间隔(共有 19 种工况),风向角的定义见图 2。为了方便后文描述,将矩形柱 4 个角点分别编号为 a、b、c、d,如图 2 所示。试验的阻塞度随着风向角的增大先增大后减小,在 20° 风向角时最大,约为 5%,满足试验要求,所以不需对试验结果进行阻塞度修正。

1.2 参数定义

不同风向角下矩形柱的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

$$C_p(i) = (P_i - P_s) / \left(\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \right) \quad (1)$$

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; U_∞ 为试验风速(10 m/s); ρ 为空气密度。平均风压系数 $C_{p,\text{mean}}$ 和脉动风压系数 $C_{p,\text{rms}}$ 分别用风压系数时程的均值和均方根表示。

矩形柱的气动力可由无量纲参数阻力系数 $C_D(i)$ 、升力系数 $C_L(i)$ 和扭矩系数 $C_M(i)$ 来表示,其定义为

$$C_D(i) = F_D(i) / \left(\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 D(\alpha) \right) \quad (2)$$

$$C_L(i) = F_L(i) / \left(\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 B(\alpha) \right) \quad (3)$$

$$C_M(i) = M(i) / \left(\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 B^2 \right) \quad (4)$$

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; $M(i)$ 为对矩形柱形心的扭矩系数时程; $D(\alpha)$ 为顺风向的投影尺寸; $B(\alpha)$ 为横风向的投影尺寸,如图 2 所示。

矩形柱的平均阻力系数 $C_{D,\text{mean}}$ 、平均升力系数 $C_{L,\text{mean}}$ 和平均扭矩系数 $C_{M,\text{mean}}$ 分别用阻力系数时程、升力系数时程和扭矩系数时程的均值来表示。脉动阻力系数 $C_{D,\text{rms}}$ 、脉动升力系数 $C_{L,\text{rms}}$ 和脉动扭矩系数 $C_{M,\text{rms}}$ 分别用阻力系数时程、升力系数时程和扭矩系数时程的均方根来表示。

矩形柱不同风向角下的旋涡脱落特性可由无量纲参数斯托罗哈数表示,其定义为

$$\text{St} = \frac{fD(\alpha)}{U_\infty} \quad (5)$$

式中, f 为旋涡脱落频率。

1.3 试验结果可靠性验证

图 4 为 0° 和 90° 风向角下平均风压系数图,可以看出平均风压系数图有良好的对称性。表 1 列出了试验得到的 0° 和 90° 风向角下的平均阻力系数和斯托罗哈数,并与已有的结果进行了对比,从表 1 中可以看出,试验的结果落在了既有文献结果之间。上述这些结果均说明试验具有一定的可靠性。

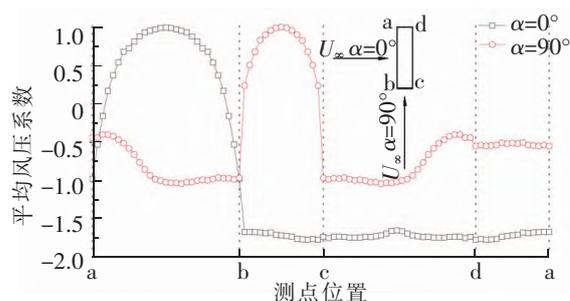


图 4 0° 和 90° 风向角下平均风压系数图

表 1 0° 和 90° 风向角下 $C_{D,\text{mean}}$ 与 St 原有试验结果对比

数据来源	0°				90°			
	$C_{D,\text{mean}}$	相对误差/%	St	相对误差/%	$C_{D,\text{mean}}$	相对误差/%	St	相对误差/%
本试验	2.380	—	0.153	—	1.270	—	0.135	—
文献[9]	2.230	6.3	0.151	1.3	1.064	16.2	0.136	0.7
文献[10]	2.510	5.4	0.156	1.9	1.371	7.9	0.152	12.5

2 试验结果分析

2.1 不同风向角下 1:4 宽厚比矩形柱的气动力

平均和脉动气动力系数随风向角的变化曲线分别如图 5、图 6 所示。

从图 5 中可以看出,平均气动力系数随风向角的增大表现出不同的变化规律。在 $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, 平均阻力系数随着风向角的增大先呈现出逐渐减小的趋势后呈现出略微增大的趋势。当 $\alpha = 0^\circ$ 时平均阻力系数取得最大值,其值在 2.38 左右;当 $\alpha = 80^\circ$ 时平均阻力系数取得最小值,其值在 1.04 左右。平均升力系数绝对值随着风向角的增大呈现出先增大后减小的规律,在 $\alpha = 30^\circ$ 时取得最大值,其值在 1.60 左右。在 $0^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$, 平均扭矩系数绝对值随着风向角的增大呈现出先增大后减小的变化规律,在 $\alpha = 55^\circ$ 时取得最大值,其值在 1.98 左右。在 $75^\circ < \alpha \leq 90^\circ$, 平均扭矩系数随着风向角的增大呈现出先增大后减小的变化规律,在 $\alpha = 85^\circ$ 时取得极大值,其值在 1.28 左右。

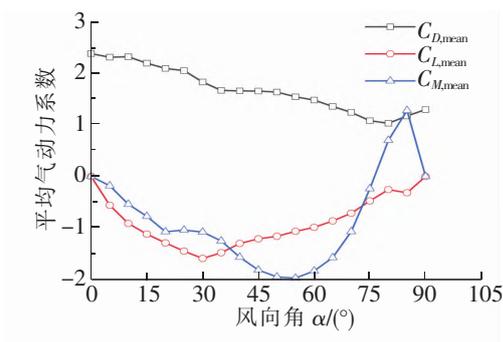


图 5 平均气动系数随风向角变化曲线

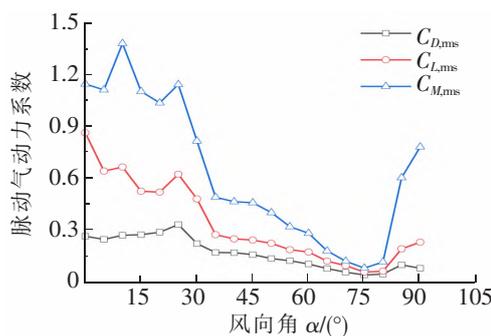


图 6 脉动气动系数随风向角变化曲线

由图 6 可知,脉动气动系数在 $0^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$ 时整体较 $25^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ 时大。在 $0^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$,脉动阻力系数和脉动升力系数均随风向角表现出了先减小后增大的规律,与脉动升力系数相比,脉动阻力系数变化更为平缓。脉动阻力系数在 $\alpha = 25^\circ$ 时取得最大值,其值在 0.34 左右;脉动升力系数在 $\alpha = 0^\circ$ 时取得最大值,其值在 0.86 左右;脉动扭矩系数在 $\alpha = 10^\circ$ 取得最大值,其值在 1.38 左右。在 $25^\circ < \alpha \leq 35^\circ$,脉动气动系数迅速降低。在 $35^\circ < \alpha \leq 75^\circ$,脉动气动系数随风向角逐渐减小,其值在 0 附近。随着风向角增大至 90° ,脉动气动系数有所增大,脉动扭矩系数增大的较为剧烈。

从图 5、图 6 可以看到,矩形柱的最大气动并未发生在 0° 和 90° 风向角下,因此在进行实际工程设计时,不能仅按照这 2 种特殊风向角对风荷载取值。

2.2 不同风向角下 1 : 4 宽厚比矩形柱的风压分布

2.2.1 不同风向角下的平均风压系数分析

风向角示意图如图 7。图 8 给出了不同风向角下 1 : 4 宽厚比矩形柱各面的平均风压系数云图。从图 8 可以看出,对于 a-b 面,当 $0^\circ \leq \alpha \leq 65^\circ$ 时,不同风向角下的平均风压系数由角点 a 到角点 b 呈现出先增大后减小的规律,极大值均在 1.0 附近,并随着风向角的增大逐渐向角点 b 靠近。当 $65^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ 时,平均风压系数由角点 a 到角点 b 也呈现出先增大后减小的规律,随着风向角的增大极大值点逐渐向角点 a 靠近。角点 a 附近的平均风压系数随风向角的增大而增大,而角点 b 附近的平均风压系数随风向角的增大而减小。对于 b-c 面,当 $0^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$ 时,平均风压系数呈现出均匀分布的特点,且其值基本不随风向角的变化而变化,稳定在 -1.5 附近。当 $25^\circ < \alpha \leq 65^\circ$ 时,随风向角的增大,平均风压系数表现出了逐渐增大的规律。值得一提的是,当 $\alpha = 30^\circ$ 时,b-c 面表现出了非常大的负压,其值达到 -2.0 左右。在对维护结构进行抗风设计时需要重点关注。当 $65^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ 时,平均风压系数由角点 b 到角点 c 呈现出了先增大后减小的规律,极大值在 1.0 左右。c-d 面和 d-a 面的平均风压分布较为类似,基本呈现出均匀分布的特点。当 $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 时,c-d 面和 d-a 面的平均风压系数基本不随风向角的变化而变化,其值稳定在 -1.5 附近,当 $\alpha > 30^\circ$ 时,随着风向角的增大,d-a 面的风压系数由 -1.5 附近逐渐增大至 -0.5 左右,c-d 面的平均风压系数仅在 $\alpha = 90^\circ$ 附近时与 d-a 面有所不同。

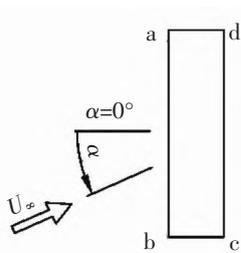


图 7 风向角示意图

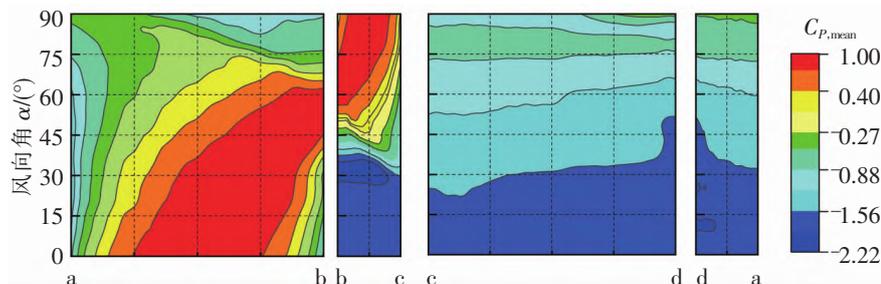


图 8 不同风向角下矩形柱各面的平均风压系数云图

2.2.2 不同风向角下的脉动风压系数分析

图 9 为不同风向角下 1 : 4 宽厚比矩形柱各面的脉动风压系数云图。从图 9 中可以看出,当 $0^\circ \leq \alpha \leq$

30°时,在 a-b 面的角点位置表现出了较大的脉动风压,这与气流的分离有关。在实际工程中,可通过角部处理的方法降低角点附近的脉动风压,如圆角、切角等^[15-16]。随着风向角的增大,角点 a 附近的脉动风压系数逐渐增大,而角点 b 附近的脉动风压系数基本保持不变。当 $30^\circ < \alpha \leq 80^\circ$ 时,a-b 面仅在角点 a 附近表现出了较大的脉动风压系数,随着风向角的增大,角点 a 附近的脉动风压系数逐渐减小至 0 附近。对于 b-c 面,当 $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ 时,脉动风压系数基本呈现出了均匀分布的特点,不同风向角下的脉动风压系数均在 0.54 附近。当 α 为 25°和 30°时,b-c 面上游区域的脉动风压系数突然增大至 0.7 附近,随着 α 增大至 35°,该区域的脉动风压系数又突然降低至 0.25 左右。随着 α 继续增大,b-c 面的脉动风压系数先逐渐减小至 0 附近,随后保持不变。c-d 面的脉动风压系数在 $0^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$ 时未表现出特别明显的分布规律,其值始终在 0.54 附近波动。当 $25^\circ < \alpha \leq 80^\circ$ 时,角点 d 附近的脉动风压系数明显较其他区域更大一些。随着风向角的增大,c-d 面的脉动风压系数逐渐减小至 0 附近。当 $80^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ 时,与 a-b 面类似,在 c-d 面的下游区域表现出了较大的脉动风压系数。在除 90°外的其他风向角下,d-a 面的脉动风压系数均表现出了角点 d 附近较大,角点 a 附近较小的分布规律。随着风向角的增大,d-a 面的脉动风压系数先增大后减小,在 $\alpha = 25^\circ$ 附近达到最大值,其值在 0.8 左右。结合前文内容可以看到,当 $\alpha = 25^\circ$ 时,在矩形柱的 b-c 和 d-a 面会出现很大的脉动风压,在进行抗风设计时,对这 2 个面应该适当加强。

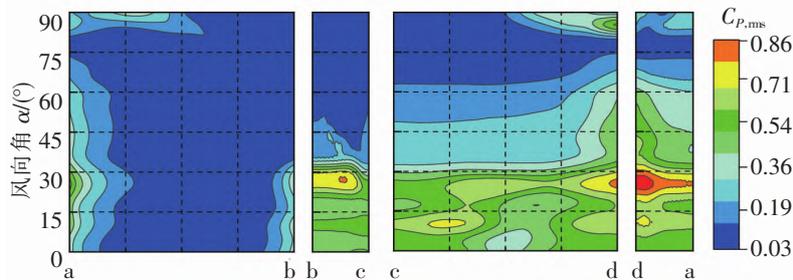


图 9 不同风向角下矩形柱各面的脉动风压系数云图

2.3 不同风向角下 1:4 宽厚比矩形柱的旋涡脱落特性

旋涡脱落频率可由升力系数时程经过傅里叶变换获得,图 10 展示 7 个不同风向角下的傅里叶幅值谱图。从图 10 可以看到,在 $0^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$,随着风向角的增大,矩形柱的幅值逐渐降低,其值在 0.02 和 0.84 之间。当 $\alpha = 90^\circ$ 时,矩形柱的幅值突然增大,其值为 0.21。

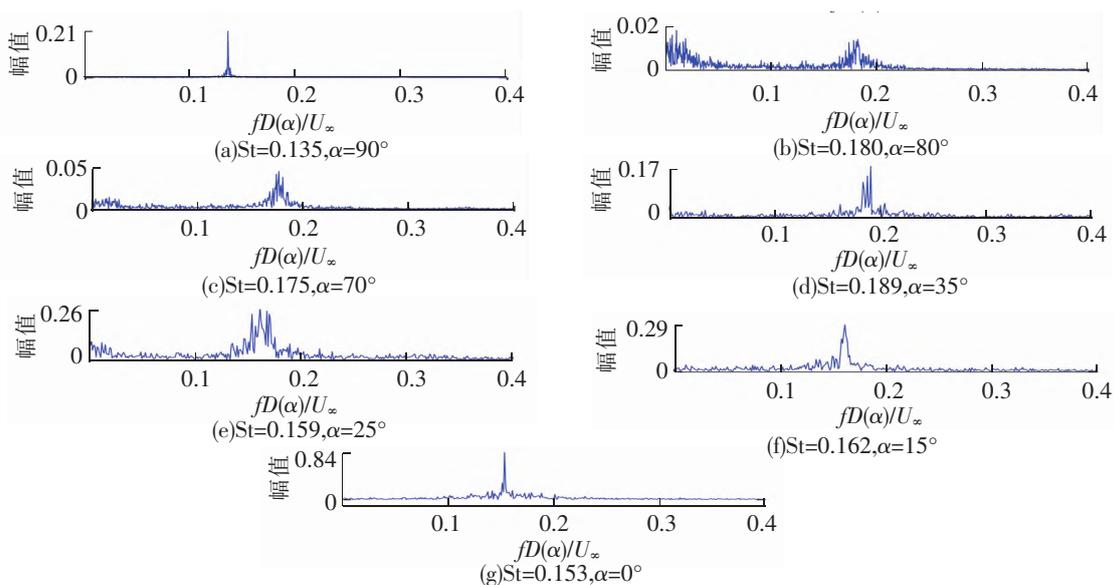


图 10 不同风向角下矩形柱的升力系数幅值谱

图 11 为斯托罗哈数随风向角的变化曲线。从图 11 可以看出,在 $0^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$,随着风向角的增大,斯托罗哈数先增大后减小,在 $\alpha = 15^\circ$ 时,取得极大值,其值在 0.162 左右。在 $25^\circ < \alpha \leq 35^\circ$,斯托罗哈数突然

增大,在 $\alpha = 35^\circ$ 时,取得最大值,其值在 0.189 左右。在 $35^\circ < \alpha \leq 80^\circ$,斯托罗哈数整体表现出了先减小后增大的趋势。在 $85^\circ < \alpha \leq 90^\circ$,斯托罗哈数突然下降至 0.135 左右。根据公式(5),斯托罗哈数和旋涡脱落频率有一定的关系,因此根据图 10 中斯托罗哈数的最大值和最小值可以得出类似建筑物存在一个旋涡脱落频率区间,所以在实际工程抗风设计中,应避免结构的自振频率处于旋涡脱落频率之间,以免引起结构发生涡激共振。

3 结论

基于刚性模型测压风洞试验研究了 $0^\circ \sim 90^\circ$ 风向角范围内宽厚比为 1:4 矩形柱的气动特性,得到了以下几点结论:

- (1) 矩形柱的平均阻力系数随着风向角的增大先减小后增大;平均升力系数的绝对值随着风向角的增大先增大后减小。最大平均阻力系数在 $\alpha = 0^\circ$ 时取得,约为 2.38,最大平均升力系数绝对值在 $\alpha = 30^\circ$ 时取得,约为 1.60。平均扭矩系数在 α 为 55° 和 85° 时取得极值,分别在 -1.98 和 1.28 左右。
- (2) $\alpha \leq 25^\circ$ 时的脉动气动力系数整体较 $\alpha > 25^\circ$ 时大。最大脉动阻力系数在 $\alpha = 25^\circ$ 时取得,约为 0.34;最大脉动升力系数在 $\alpha = 0^\circ$ 时取得,约为 0.87;最大脉动扭矩系数在 $\alpha = 10^\circ$ 取得,约为 1.35。
- (3) 斯托罗哈数在 α 为 $15^\circ \sim 35^\circ$ 发生了突升现象,在 α 为 $85^\circ \sim 90^\circ$ 时发生了突降现象。最大斯托罗哈数在 $\alpha = 35^\circ$ 时取得,约为 0.189。

参 考 文 献

- [1] Massai T, Zhao J, Jacono D L, et al. The effect of angle of attack on flow-induced vibration of low-side-ratio rectangular cylinders[J]. Journal of Fluids and Structures, 2018, 82: 375-393.
- [2] 孙一飞,乔富贵,贾娅娅,等. 二维细长柱体气动力特性试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2019, 32(2): 10-15.
- [3] 马文勇,张璐,黄铮汉,等. 方形超高层建筑风振轨迹及耦合效应试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(3): 8-14.
- [4] 杨群,刘小兵. 风攻角对宽高比为 5 的矩形断面梁气动力特性的影响[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2015, 28(1): 6-11.
- [5] 杨晶,许福友,曾冬雷. 宽高比为 10 的矩形断面气动特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(14): 109-115.
- [6] 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.
- [7] 邓燕华,祝志文. 全风向角下二维方柱绕流数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(9): 1796-1802.
- [8] 刘小兵,吴倩云,孙亚松. 不同风向角下方柱气动特性的风洞试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(15): 94-98.
- [9] Shimada K, Ishihara T. Application of a modified k- ϵ model to the prediction of aerodynamic characteristics of rectangular cross-section cylinders[J]. Journal of Fluids and Structures, 2002, 16(4): 465-485.
- [10] Yu D, Butler K, Kareem A, et al. Simulation of the influence of aspect ratio on the aerodynamics of rectangular prisms [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(4): 429-438.
- [11] Sohankar A. Large eddy simulation of flow past rectangular-section cylinders; Side ratio effects[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(5): 640-655.
- [12] 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.
- [13] Hirano H, Watanabe S, Maruoka A, et al. Aerodynamic characteristics of rectangular cylinders[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 1999, 12(2): 151-163.
- [14] Okajima A. Flow around a rectangular cylinder with a section of various width/height ratios[J]. Wind Engineers, JAWE, 1983, 1983(17): 1-19.

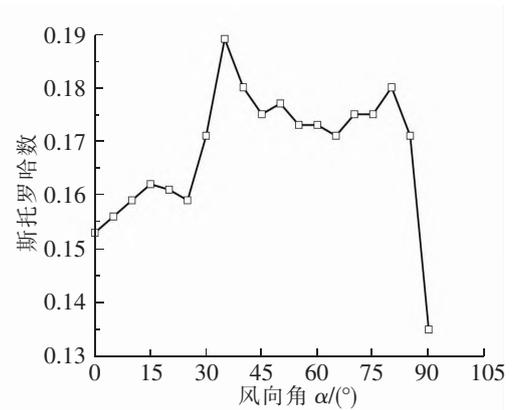


图 11 矩形柱的斯托罗哈数随风向角变化曲线

- [15]董欣,丁洁民,邹云峰,等. 倒角化处理对于矩形高层建筑风荷载特性的影响机理研究[J]. 工程力学, 2021, 38(6): 151-162.
- [16]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.

Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of Rectangular Cylinder with Width-Thickness Ratio of 1 : 4 at Different Wind Attack Angles

Fan Jiahao¹, Feng Bin¹, Jiang Huimin¹, Liu Xiaobing^{1,2,3}, Yang Qun^{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: Based on the wind tunnel test of rigid model, the aerodynamic characteristics of rectangular cylinder with width-thickness ratio of 1 : 4 in the range of $0^\circ \sim 90^\circ$ wind attack angle were analyzed, and the variation rules of wind pressure coefficient, aerodynamic coefficient and St number wind direction angle were obtained. The results show that the average drag coefficient decreases first and then increases with the increase of wind attack angle. The absolute value of average lift coefficient increases first and then decreases with the increase of wind attack angle. The minimum and maximum values of the average torque coefficients are obtained when α are 55° and 85° respectively. The pulsating aerodynamic coefficients are larger when $\alpha \leq 25^\circ$ than when $\alpha > 25^\circ$. The St number changes when α are $15^\circ \sim 35^\circ$ and $85^\circ \sim 90^\circ$.

Key words: rectangular cylinder; aerodynamic characteristic; wind attack angle; wind tunnel test