# 宽高比对扁平箱梁气动力特性的 影响规律及流场机理研究

范佳豪<sup>1</sup>, 刘慧杰<sup>1</sup>, 姜会民<sup>1</sup>, 刘小兵<sup>1,2,3</sup>, 杨 群<sup>1,2,3</sup>

(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:为研究宽高比对扁平箱梁气动力特性的影响规律及流场机理,以国内某跨海大桥初 步设计方案为背景,在7个风攻角下对4个不同宽高比的扁平箱梁进行了数值模拟研究,得到了 扁平箱梁的三分力系数、风压系数和时均流线图。研究表明,扁平箱梁的阻力系数受宽高比的 影响比升力系数和扭矩系数显著。宽高比的增加会使扁平箱梁受到的阻力减小,但会使其受到 更大的升力和扭矩。不同宽高比下扁平箱梁所形成旋涡的位置基本相同,但大小和强度不同, 这直接导致了扁平箱梁所受气动力的变化。

关键词:扁平箱梁;宽高比;风攻角;三分力系数;风压系数;时均流线图 中图分类号:U441.3 文献标志码:A 文章编号:2095-0373(2022)03-0017-07

0 引言

现代的桥梁不断向着大跨和轻柔的方向发展,对风荷载愈发敏感<sup>[1-2]</sup>。扁平箱梁由于具有横向抗弯、 抗扭性能好及良好的颤振稳定性<sup>[3-5]</sup>等优点,被广泛地应用于实际工程中,如国内建设的江东大桥<sup>[6]</sup>、青 岛海湾大桥<sup>[7]</sup>,主梁都采用了扁平箱梁。掌握扁平箱梁的气动力特性及其发生机理对于扁平箱梁桥的抗 风设计及气动优化<sup>[8-9]</sup>具有重要的参考价值。

已有学者对扁平箱梁进行了一些研究。其中李永乐等<sup>[10]</sup>以琼州海峡为背景,通过数值模拟对其主跨 为3500m的超大跨度悬索桥中的扁平单箱梁进行了气动力特性的研究。研究结果发现,扁平单箱梁的 三分力系数绝对值随风攻角增大而增大,较大风攻角下的扁平单箱梁稳定性能降低;而扁平箱梁的斯托 罗哈数较小,表明该主梁型式具有较为良好的涡振性能。祝志文等<sup>[11]</sup>以丹麦大带东桥主跨加劲梁为研究 对象,对不同风攻角下的扁平箱梁进行了二维数值计算,并将二维和三维主梁的整体气动力特性、表面压 力分布进行对比。结果发现,在典型风攻角下扁平箱梁具有单一斯托罗哈数,且均大于成桥的状态。杨 阳等<sup>[12]</sup>以寸滩长江大桥主桥的加劲梁为研究对象,采用风洞试验和数值模拟相结合的方法对扁平钢箱梁 的气动力特性和涡振性能进行了研究。结果表明,该宽体扁平钢箱梁在不同风速下的静力三分力系数十 分接近,受雷诺数的影响较小,该梁对风攻角变化比较敏感。李春光等<sup>[13]</sup>通过节段模型试验的方法,研究 了宽高比为 11.08 的扁平钢箱梁在不同条件下对其气动力特性的影响。研究结果发现,随着风攻角由负 变正,扁平钢箱梁断面的扭转气动力特性偏于不安全,而且在悬挑臂导流板以及底板设竖直中央稳定板 不适于提高扁平钢箱梁断面的气动力特性。

从国内外学者的研究中可以发现,当前的研究多以某一工程实例为背景展开,其中研究的扁平箱梁

**收稿日期:**2022-04-11 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20220095

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。E-mail:fjh15614413361@163.com

范佳豪,刘慧杰,姜会民,等.宽高比对扁平箱梁气动力特性的影响规律及流场机理研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35 (3):17-22.

的宽高比多为某一固定值。然而,随着交通量的日益增长,桥面逐渐向着更宽幅的方向发展,当前研究尚 不能预测更宽幅扁平箱梁的气动力特性。因此,需要对扁平箱梁进行更为系统的研究,揭示截面宽高比 对扁平箱梁气动力特性的影响规律,以更好地指导实际工程。以某跨海大桥初步设计方案为工程背景, 通过 CFD 数值模拟的方法研究了4种不同宽高比扁平箱梁在7个风攻角下的气动力特性,并对其发生机 理进行了分析。

## 1 数值计算方法与计算模型

#### 1.1 数值计算方法

在流体力学中通过动量方程、连续性方程和能量方程来体现 3 个最基本的守恒定律(动量守恒定律、 质量守恒定律及能量守恒定律)。其中不可压缩流动的连续性方程、动量守恒方程及能量方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$$
(2)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[ u_{1}(\rho E + p) \right] = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_{i}} \right) - \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + u_{i}(\tau_{ij})_{eff} + S_{h}$$
(3)

式中, $\rho$ 为静压; $\tau_{ij}$ 为应力张量; $g_i$ 、 $F_i$ 分别为i方向上的重力体积力和外部体积力。

数值计算方法采用雷诺平均法。CFD 数值分析中,合理选取湍流模型是准确模拟箱梁断面周边流场的基本前提<sup>[14]</sup>。SST k-ω 湍流模型综合了标准 k-ε 模型和 k-ω 模型各自的优缺点,使得 SST k-ω 湍流模型能获得优于标准 k-ε 模型和 k-ω 模型的模拟结果。通常认为 SST k-ω 湍流模型是 RANS 模型中求解表现较好的湍流模型之一,比较适合于流动分离区的求解<sup>[15]</sup>。所以数值计算模型采用 SST k-ω 湍流模型。

#### 1.2 数值计算模型

以某跨海大桥初步设计方案为工程背景,扁平箱梁节段模型尺寸如图 1 所示,扁平箱梁模型宽度 B = 370 mm,高度 H = 64 mm,风攻角选用 - 6° ~ 6°,风攻角方向沿风向斜向上为正,风速采用 6 m/s。此扁平箱梁的宽高比为 B/H = 5.78,为了进一步研究不同宽高比对扁平箱梁气动效应的影响,增加 B/H = 5.0、8.0、10.0 3 个不同宽高比的扁平箱梁,然后对 4 个不同宽高比的扁平箱梁进行数值模拟计算。对于扁平箱梁的二维数值计算,首先应确定它的边界条件和计算域,计算域选用矩形域进行计算,速度入口设置为 velocity-inlet,出口设置为 outflow,上、下边界为 symmetry,因对称边界距箱梁模型中心的尺寸、速度

入口边界对计算网格数量影响不大,故查阅文献[16]、文献[17]后将 其确定为 10B。经过试算后可知,当尾流区长度大于 20B 时,计算结 果不再发生变化,故尾流区长度确定为 20B。图 2 为扁平箱梁的计 算域和边界条件示意图。通过试算当首层网格厚度为 0.03 mm 时可 以保证无量纲 Y+在 1.0 左右,故设置首层网格尺寸为0.03 mm。图 3 给出了 B/H=5.78 扁平箱梁的局部网格示意图。





图 1 节段模型尺寸图(单位:mm)



图 3 扁平箱梁局部网格示意图

第3期

#### 1.3 参数定义及结果验证

扁平箱梁的阻力系数 C<sub>D</sub>、升力系数 C<sub>L</sub> 和扭矩系数 C<sub>M</sub> 的定义分别为

$$C_D = 2F_D / \rho U^2 B \tag{4}$$

$$C_L = 2F_L / \rho U^2 B \tag{5}$$

$$C_M = 2M_T / \rho U^2 B^2 \tag{6}$$

式中, $F_D$ 、 $F_L$ 、 $M_T$ 分别为顺风向阻力、横风向升力和扭矩; $\rho$ 为空气密度;U为风速;B为扁平箱梁宽度。三分力示意图如图 4 所示。

为了验证数值计算结果的准确性,将数值计算结果 与文献[18]的风洞试验结果(宽高比 *B*/*H*=5.78)进行 了对比,如图 5 所示。从图 5 可以看到,对于阻力系数而 言,数值计算结果和风洞试验结果略微有些差别,数值相 差不大,但二者在变化规律上一致,均随风攻角的增大呈 现出先缓慢减小后逐渐增大的变化规律。对于扁平箱梁 的升力系数和扭矩系数,数值计算结果与风洞试验结果 吻合较好。以上结果说明,数值计算结果具有一定的可 靠性。



图 4 三分力示意图



图 5 宽高比为 5.78 时三分力系数的对比

2 宽高比对扁平箱梁气动力特性的影响规律

2.1 三分力系数

图 6 为不同宽高比下扁平箱梁的三分力系数随风攻角的变化曲线,从图 6 可以看到扁平箱梁在不同宽 高比下的阻力系数随风攻角的变化规律基本一致,随着风攻角由一6°增加到 6°,扁平箱梁的阻力系数先缓慢 减小后逐渐增大,在风攻角为 6°时达到其最大值,最大值为宽高比为 5.0 的时候,其最大值约为 0.14。同时可 以看到,随宽高比的增大,扁平箱梁在不同风攻角下的阻力系数均呈现出逐渐减小的规律。当风攻角为 6° 时,宽高比为 5.0,5.78,8.0 和 10.0 的扁平箱梁其阻力系数分别约为 0.14,0.12,0.1 和 0.09。



扁平箱梁在不同宽高比下的升力系数均随风攻角的增加表现出了先增大后减小的变化规律。当 B/H=5.0和5.78时,升力系数极大值发生在风攻角为2°时;当B/H=8.0和10.0时,升力系数极大值发 生在风攻角为4°时。当风攻角为-6°~2°时,扁平箱梁在不同宽高比下的升力系数基本一致,随着风攻角 的增加,由-0.7左右逐渐增加至0.2 附近。当风攻角为4°~6°时,扁平箱梁的升力系数随宽高比的增大 表现出了逐渐增大的规律。当B/H=5.0和5.78时,扭矩系数在风攻角达到0°时趋于平稳,当B/H=8.00和10.0时,扭矩系数在风攻角达到2°时趋于平稳。对比变扁平箱梁在不同宽高比下的扭矩系数可以看 到,当风攻角为-6°~0°时,随着宽高比的增加扭矩系数呈现出逐步减小的变化规律,当风攻角为4°~6° 时,随着宽高比的增加扭矩系数略有增大。当风攻角为-6°时,扭矩系数绝对值最大,宽高比为5.0、5.78、 8.0和10.0的扁平箱梁其扭矩系数最大绝对值分别约为0.09、0.11、0.13和0.14。综合以上结果不难发现,宽高比的增加会使扁平箱梁受到的阻力减小,但会使其受到更大的升力和扭矩。

#### 2.2 风压系数

扁平箱梁气动力特性的发生机理可通过风压分布进行分析<sup>[19-20]</sup>。为此,给出了不同宽高比下扁平箱 梁表面的风压分布,如图7所示,需要说明的是,受篇幅限制,仅展示风攻角为 $\pm$ 6°和0°。图7的风压系数 定义为式(7),其中 $P-P_0$ 为模型表面压力与参考压力的压力差。为便于描述,将扁平箱梁的角点依次 记作a,b,c,d,e,f,如图4所示。记ab面,bc面及cd面分别为迎风侧直腹板、上顶板及背风侧直腹板, de面、ef面及fa面分别为背风侧斜腹板、下底板及迎风侧斜腹板。





$$C_{p} = (P - P_{0}) / 0.5 \rho U^{2}$$
<sup>(7)</sup>

图 7 为 $\pm$ 6°和 0°风攻角下不同宽高比下扁平箱梁表面平均风压系数随宽高比的变化曲线,从图 7 可以 看到扁平箱梁在不同风攻角下的平均风压系数随宽高比的变化规律基本一致。在 $-6^{\circ}$ 风攻角下,不同宽高 比扁平箱梁受正压的部分为 *ab* 面和部分 *bc* 面,其余部分均受负压的影响。不同宽高比扁平箱梁 *ab* 面的平 均风压系数由角点 *a* 到角点 *b* 逐渐增大。扁平箱梁 *cd* 面和 *de* 面的平均风压系数变化幅度比 *ef* 面和 *fa* 面 要小。在 0°风攻角下,不同宽高比下扁平箱梁的平均风压系数仅有 *ab* 面为正值,其他面均为负值。在 *bc* 面 上不同宽高比的负压由角点 *b* 到角点 *c* 表现出逐渐减小的规律。还可以明显看出在角点 *f* 附近受到的负压 最大,其值约为-0.9。在 6°风攻角下,不同宽高比扁平箱梁受正压的部分为 *ab* 面和靠近角点 *a* 的 *fa* 面,其 余部分均受负压的影响。不同宽高比扁平箱梁 *ab* 面的平均风压系数由角点 *a* 到角点 *b* 逐渐减小。对于不 同宽高比扁平箱梁的阻力系数,起主要影响作用的是扁平箱梁 ab 面、cd 面、de 面及 fa 面的风压。ab 面的 正压随着风攻角的增大变化不大,cd 面、de 面及 fa 面的负压随着风攻角的增大逐渐减小,所以 cd 面、de 面 和 fa 面的风压大小决定了箱梁阻力系数随着宽高比的增大而逐步减小。对于不同宽高比扁平箱梁的升力 系数,起主要影响作用的是扁平箱梁 bc 面和 ef 面的风压,随着风攻角的增大 bc 面的负压越来越大,ef 面的 正压越来越大,同时也受到扁平箱梁 de 面和 fa 面的影响。从图 7 中可以看出扁平箱梁 bc 面和 ef 面的压 力差随着宽高比的增大变化不明显,这较好解释了图 6(b)升力系数规律的一致性。

## 3 气动力特性的流场机理分析

下面从流场角度来解释不同宽高比扁平箱梁风压系数的变化规律。图 8 为不同宽高比一6°风攻角下的时均流线图,从图 8 可以看到,不同宽高比扁平箱梁所形成旋涡的位置基本相同,均出现在扁平箱梁的 cd 面、fa 面和 de 面附近,但旋涡大小不一。当宽高比为 5.0 时,扁平箱梁 cd 面、fa 面和 de 面均出现了 旋涡,对扁平箱梁产生负压作用;随宽高比的增大,扁平箱梁 cd 面形成的旋涡越来越小,致使扁平箱梁所 受到的负风压逐渐减小,这验证了图 7(a)中 cd 面和 de 面的平均风压系数绝对值随宽高比的增大而减小 的变化规律。



图 8 - -6°不同宽高比箱梁时均流线图 图 9 为不同宽高比 0°风攻角下的时均流线图,从图 9 可以看到,靠近角点 b 附近的旋涡中心随宽高比 的增大,旋涡中心在逐渐向角点 b 移动。不难发现的是当旋涡随宽高比增大逐渐变小的时候,cd 面附近 仍有 3 个旋涡。当宽高比为 5.0 时,旋涡对扁平箱梁产生负压作用。随宽高比的增大,扁平箱梁 cd 面形 成的旋涡越来越小,致使 cd 面和 de 面的平均风压系数绝对值随宽高比的增大而减小。



图 9 0°不同宽高比箱梁时均流线图

图 10 为不同宽高比 6<sup>°</sup>风攻角下的时均流线图,从图 10 可以看到,不同的宽高比所形成旋涡的位置 基本相同。当宽高比为 5.0 和 5.78 时,扁平箱梁 bc 面、cd 面均出现了旋涡。随宽高比的增大,扁平箱梁 bc 面形成的旋涡无明显变化,所以扁平箱梁 bc 面的风压变化表现不明显。但扁平箱梁 cd 面形成的旋涡 随宽高比的增大越来越小,当宽高比为 8.0 时,扁平箱梁 cd 面不再形成旋涡,这致使 cd 面的负压随宽高 比的增大而减小,所以扁平箱梁 cd 面的平均风压系数绝对值随宽高比的增大而减小。



图 10 6°不同宽高比箱梁时均流线图

## 4 结论

基于数值模拟研究了一6°~6°风攻角范围内不同宽高比扁平箱梁的气动力特性,得到了以下结论:

(1)扁平箱梁的阻力系数随风攻角由一6°增大到 6°呈现出先缓慢减小后逐渐增大的变化规律;升力系数呈现出先增大后减小的变化规律;扭矩系数呈现出先增大后趋于平稳的变化规律。宽高比的增加会使扁平箱梁受到的阻力减小,但会使其受到更大的升力和扭矩。

(2)不同的宽高比扁平箱梁所受的风压不同,扁平箱梁迎风侧直腹板所受风压基本不随宽高比发生 变化,迎风侧斜腹板所受风压随宽高比的变化规律与风攻角有关,其他面所受风压随宽高比的增大呈现 出逐渐增大的规律。不同的风攻角下扁平箱梁所受的风压也不同,随着风攻角的增大,上顶板所受负压 越来越强,迎风侧斜腹板所受负压越来越弱。

(3)旋涡主要存在于扁平箱梁上顶板和尾流处,负攻角下在箱梁的迎风侧斜腹板处也有旋涡出现。
不同宽高比下扁平箱梁所形成旋涡的位置基本相同,但大小和强度不同。箱梁上顶板所形成的旋涡对箱
梁升力系数的大小起决定性作用。

## 参考文献

- [1]苟国涛,叶征伟,项贻强,等. 双幅并行连续刚构桥箱梁断面三分力系数气动干扰效应数值模拟[J]. 公路工程, 2013,38 (2): 196-201.
- [2] **刘志**文, 陈政清, 栗小祜, 等. 串列双流线型断面涡激振动气动干扰试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(3): 51-57.
- [3]郭春平,白桦,洪光.双幅桥静分力系数气动干扰效应研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(5): 899-902.
- [4] **刘小**兵,杨群,刘志文. 气动干扰对串列双幅类流线形断面颤振的影响[J]. 振动与冲击, 2014, 33(8): 161-164.
- [5] **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): 6-13.
- [6] 邵亚会,赵林,葛耀君. 江东大桥分体式扁平双箱梁悬索桥颤抖振研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(1): 68-72.
- [7] **刘志**文,陈政清,刘高,等. 双幅桥面桥梁三分力系数气动干扰效应试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35 (1): 16-20.
- [8]Chen X, Qiu F, Tang H, et al. Effects of secondary elements on vortex-induced vibration of a streamlined box girder[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(1): 173-184.
- [9]Mei H, Wang Q, Liao H, et al. Improvement of flutter performance of a streamlined box girder by using an upper central stabilizer[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(8): 1-11.
- [10]李永乐,安伟胜,李翠娟,等. 超大跨度悬索桥扁平单箱主梁气动力特性 CFD 分析[J]. 西南公路, 2010(4): 24-27.
- [11]祝志文,袁涛,陈魏. 扁平箱梁气动力特性 CFD 模拟的维数对比研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(8). 1555-1562.
- [12]杨阳,张亮亮,吴波,等. 宽体扁平钢箱梁气动力特性及涡振性能研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(1): 70-75.

[13]李春光,陈政清,韩艳. 带悬臂流线型箱梁大比例节段模型涡振试验研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(6): 12-18.

- [14]李永乐,陈星宇,汪斌,等. 扁平箱梁涡激共振阻塞效应及振幅修正[J]. 工程力学, 2018, 35(11): 45-52.
- [15]祝志文,李宏博.风洞模型棱角制作误差对扁平箱梁气动力和涡脱特性的影响[J].振动与冲击,2020,39(6):181-188.
- [16]杨永恒. 钝体箱形截面双幅主梁气动干扰效应数值研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [17]周帅. 基于 FLUENT 的大跨度双幅桥面桥梁气动干扰性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [18] 刘小兵,李少杰,杨群,等.气动干扰对分离双扁平箱梁三分力系数的影响[J].桥梁建设,2017,47(5):53-58.
- [19] 胡传新,陈海兴,周志勇,等. 流线闭口箱梁断面涡振过程分布气动力演变特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49 (12): 137-145.
- [20]郭增伟,赵林,葛耀君,等.基于桥梁断面压力分布统计特性的抑流板抑制涡振机理研究[J].振动与冲击,2012,31 (7):89-94.

(下转第49页)

# Numerical Simulation for Pullout Behavior of Inclined Steel Fiber in Cement—Based Materials

Bi Jihong<sup>1,2</sup>, Zhang Jinbo<sup>1</sup>, Zhao Yun<sup>1</sup>, Wang Zhaoyao<sup>1</sup>, Li Caiqiang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of China Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract**: Adding steel fibers to cement-based materials can significantly improve its tensile toughness and residual tensile strength. Investigating the pullout mechanism of the single steel fiber is a prerequisite for studying the mechanical properties of fiber reinforced cement-based composites and structural components. In this paper, the numerical simulation method was adopted. Firstly, the two-dimensional finite element model of the steel fiber (inclination angle 0°) in the cement-based material was established, and the fiber pullout behavior was simulated. Also, considering the matrix spalling and snubbing effect, the finite element models of the inclined steel fibers were established. The accuracy of the above models was verified by comparing the simulated results with the existing single fiber pullout test data. Furthermore, the effect of the inclined angle on the fiber pullout behavior was studied. The results show that the peak pullout load reaches the largest value when the fiber inclination angle is between 25° and 30°.

Key words: fiber pullout; numerical simulation; matrix spalling; snubbing effect; inclined angle

(上接第 22 页)

# Influence Rules of Width—Height Ratios on Aerodynamic Force Characteristics and Flow Field Mechanisms of Flat Box Girder

Fan Jiahao<sup>1</sup>, Liu Huijie<sup>1</sup>, Jiang Huimin<sup>1</sup>, Liu Xiaobing<sup>1,2,3</sup>, Yang Qun<sup>1,2,3</sup>

School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
 Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China;
 State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to study the influence of width-height ratios on aerodynamic force characteristics and flow field mechanism of flat box girder, the numerical simulation of four flat box girder with different width-height ratios was carried out at seven wind attack angles, and the three-component force coefficient, wind pressure coefficient and time-average flow diagram of flat box girder were obtained with the preliminary design of a cross-sea bridge as the research background. The results show that the drag coefficient of flat box girder is significantly affected by width-height ratios than lift coefficient and torque coefficient. With the increase of width-height ratios, the flat box girder will suffer less resistance, but more lift force and torque. The positions of vortices formed by flat box girders with different widthheight ratios are basically the same, but their sizes and intensities are different, which directly lead to the changes of aerodynamic forces on flat box girders.

Key words: streamlined box girder; width-height ratio; wind attack angle; three-component force coefficient; wind pressure coefficient; time-mean flow diagram