

# 建筑模型风洞试验阻塞效应研究进展

顾明, 黄剑

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 由于壁面的存在, 风洞试验模拟的流场与真实大气的自由流场存在差别. 在特定情况下, 阻塞效应对流场和建筑风荷载产生严重影响, 导致风洞试验数据产生较大误差. 然而, 当前结构风工程研究人员对阻塞效应的认识尚且不足. 首先, 简要介绍了阻塞效应的机理, 并归纳了阻塞效应对流场和建筑风荷载的影响. 然后, 总结了阻塞效应的影响因素(来流特性, 建筑的外形、数量和布置方式等), 回顾了涉及试验和数值模拟的阻塞效应修正方法, 并列出了重要文献中对阻塞比的规定. 最后, 提出了今后值得研究的方向.

**关键词:** 建筑结构; 风洞试验; 阻塞效应; 修正方法

**中图分类号:** TU317.1

**文献标志码:** A

## Research Progress of Wind Tunnel Blockage Effects on Building Models

GU Ming, HUANG Jian

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The flow simulated in a wind tunnel is different from that in the free stream of the atmosphere in reality because of the existence of tunnel walls. In certain conditions, large blockage ratios will seriously distort the flow around the building models and the aerodynamics of the building models. Therefore, errors will exist in test results. However, structural wind engineering researchers have paid a little attention to blockage effects. Firstly, this paper briefly introduces the mechanism of blockage effects and concludes the characteristics of the flow and the aerodynamics of buildings under the blockage. Secondly, the main factors which influence the blockage effects are summarized including inflow characteristics, the shape, the number and the arrangement of buildings, etc. Furthermore, the blockage correction methods involved with wind tunnel tests and numerical simulation are reviewed, and the limitation of the blockage ratio is listed from classic works. Finally, some

recommendations for future studies are proposed.

**Key words:** building structure; wind tunnel test; blockage effect; correction method

风洞试验是研究建筑结构风荷载的重要手段. 风洞试验时, 将实际建筑按照一定比例缩尺制作并安装在风洞中. 当建筑物的动力响应不重要而通过模型风洞试验仅仅是为了获得其平均风压(体型系数)时, 应尽量模拟建筑的细部构造, 所以在允许的范围内(主要是阻塞比控制时)模型应尽可能大. 这一设计思想将导致体型较大的单体建筑和有密集周边的群体建筑的阻塞比较大. 当然, 对于试验段截面面积较小的风洞而言, 阻塞效应可能是经常面临的问题. 阻塞效应主要依赖于模型尺寸和风洞工作段截面尺寸, 以来流方向的模型投影面积与风洞截面面积的比值, 即阻塞比(BR)为表征. 程厚梅<sup>[1]</sup>在《风洞实验干扰与修正》中指出: 在低速实壁风洞中, 当迎角接近 $90^\circ$ 时, 6.6%的阻塞比将对 YF-16 飞机模型阻力系数造成约 25%的误差, 15.0%的阻塞比将导致最大误差达 88%; 阻塞效应对垂直于来流的圆形平板压力系数的误差可能高达真值的数倍. 可见阻塞效应对于获得准确试验结果的重要性.

航空航天领域的相关研究表明, 阻塞效应是空气动力学试验的基础问题, 对试验结果的精度有举足轻重的影响. 遗憾的是, 结构风工程领域对阻塞效应的重视程度和相关研究远远不够. 人们普遍认为将阻塞比控制在 5%以内就可以忽略阻塞效应<sup>[2-8]</sup>, 但也有学者<sup>[9]</sup>认为当阻塞比为 5%时影响已经很严重. 仅仅由阻塞比 5%这一标准来避免阻塞效应似乎仅仅是约定俗成的观点, 并没有可靠科学依据. 和航空航天领域的相关研究不同, 结构风工程领域的研

收稿日期: 2015-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(90715040, 91215302)

第一作者: 顾明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为风工程. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

通讯作者: 黄剑(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为超高层建筑抗风. E-mail: huangjiannt@126.com

究涉及到高湍流和群体建筑的问题. 由于问题的复杂性, 目前少有文献涉及阻塞效应对建筑结构风洞试验结果的影响, 一些试验人员在进行实际工程抗风试验时, 甚至忽视了阻塞效应.

面对结构风工程精细化研究的需要, 开展阻塞效应这一基础研究对结构抗风研究和设计具有重要意义. 本文首先介绍阻塞效应的机理及其影响, 然后对影响阻塞效应的因素和阻塞效应修正方法进行全面的回顾与评述, 并列出了重要文献中对阻塞比的规定. 最后, 提出今后值得研究的方向.

## 1 阻塞效应机理

气流流经建筑物将产生绕流和尾流, 洞壁约束使侧面流线和尾流无法自由扩展, 而在实际大气边界中气流是没有任何约束的(见图1). 建筑结构外形绝大多数为钝体, 存在旋涡脱落和宽阔的尾流分离. 侧面绕流和分离区的旋涡脱落以及尾流无法在垂直于来流的方向顺利扩展, 所以相邻流线之间气流通过的面积比无约束时小, 模型和洞壁之间平均流速将增大. 当然, 侧面旋涡脱落和尾流受到限制也会影响到结构表面气动力特性. 上述洞壁对流场和结构气动力的影响称为阻塞效应. 在开口自由射流风洞中, 为了满足射流边界上的压力平衡条件, 流线会过分向外扩展, 相当于增大了相邻流线之间的气流通面积. 因而, 开口射流风洞的阻塞效应与实壁风洞的阻塞效应相反, 两者平均阻力系数试验结果的比较见图2.

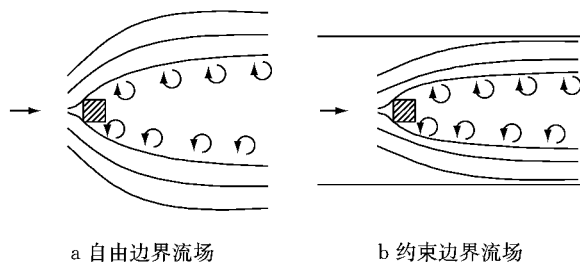


图1 二维阻塞流场示意图

Fig.1 Two-dimensional flow schematic of blockage effects

Pankhurst 等<sup>[10]</sup>指出壁面干扰包括: ①实体阻塞, 指的是边界出现时模型侧面流速的变化; ②尾流阻塞, 指的是尾流外部流速增大、尾流速度降低的效应和尾流扩展宽度的变化; ③升力效应, 指的是在附着涡和尾涡区造成的约束效应; ④壁面边界层的干扰; ⑤静压梯度的干扰.

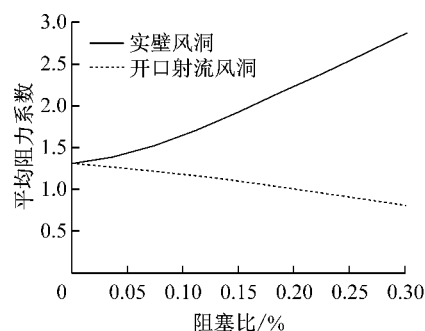


图2 实壁和开口射流风洞中方柱平均阻力的比较<sup>[11]</sup>

Fig.2 Comparison of mean drags of square cylinder between solid and open jet wind tunnels<sup>[11]</sup>

对称物体不存在升力效应, 但若物体存在攻角, 经过模型的气流会向一侧偏斜, 而风洞壁面对气流的约束造成实际风向角不等于所期望的风向角. 通常风洞试验段截面设计了切角, 可有效抑制边界层的发展, 所以壁面边界层的干扰可忽略. 实体和尾流阻塞加上尾流中的压力梯度效应将是壁面干扰效应中的主要部分. 图3和4分别为风洞试验段中实体阻塞和尾流阻塞效应的示意图. 洞壁会引起沿风洞轴线方向的静压变化, 沿流向造成一定静压梯度. 阻塞比越大沿流向的压力梯度越大, 这将会在结构上产生附加阻力. 由于问题的复杂性, 通常将上述几种效应整体考虑.

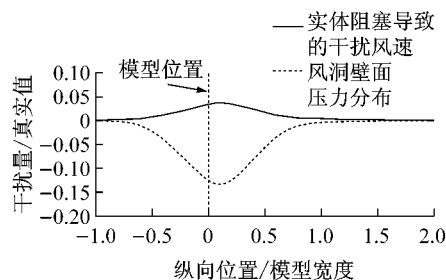


图3 实体阻塞对速度和压力的影响<sup>[12]</sup>

Fig.3 Solid blockage effects on velocity and pressure in wind tunnel<sup>[12]</sup>

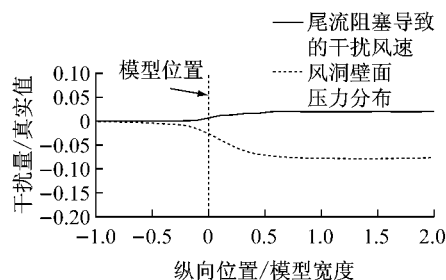


图4 尾流阻塞对速度和压力的影响<sup>[12]</sup>

Fig.4 Wake blockage effects on velocity and pressure in wind tunnel<sup>[12]</sup>

## 2 阻塞效应带来的影响

### 2.1 流场特性

Rosenhead 等<sup>[13]</sup>在水洞中使用成像技术研究均匀流中阻塞效应对雷诺数  $Re$  为 50~800 的圆柱尾流的影响. 改变壁面距离调整阻塞比为 6%~66%, 发现尾流的横向和纵向间距随着阻塞比的增加而减小, 但在 33% 的阻塞比时尾流横向和纵向间距比仍保持为定值. Chakraborty 等<sup>[14]</sup>对均匀流中  $Re$  为 0.1~200.0 的二维圆柱的数值模拟发现, 阻塞比越大平均阻力系数越大, 分离点前移, 尾流中旋涡间距变小. West 等<sup>[15]</sup>对低湍流均匀流中  $Re$  为 1 000~10 000 的二维圆柱进行测压试验研究, 发现当阻塞比小于 6% 时, 阻塞比的增大使分离点逐渐向下游移动; 当阻塞比为 6%~9% 时, 分离点向上游移动; 当阻塞比大于 16% 时, 分离点位置不变.

Cherry<sup>[16]</sup>指出 5% 的阻塞比会使均匀流中大厚宽比矩形柱的再附长度减小 20%. Okajima 等<sup>[17]</sup>发现, 对于均匀流中的二维矩形柱, 随着阻塞比增大, 壁面约束增强, 尾流中旋涡的横向和纵向间距都减小, 且旋涡的耗散距离将缩短. Patil 等<sup>[18]</sup>采用数值模拟对均匀流中阻塞比为 20%~70%、 $Re$  为 100~200 的二维方柱的流场和旋涡脱落进行细致研究, 指出随着阻塞比增大, 尾流泡长度减小. 阻塞效对方柱前方流场速度的影响较小, 但使模型附近流速明显增大, 且流速在模型下游充分发展所需要的距离减小.

Awbi<sup>[19]</sup>对均匀流中二维矩形柱的测压试验结果表明, 阻塞比增大会使迎风前缘分离的剪切层更加靠近物体. 当矩形厚宽比为 0.5~1.0 时, 阻塞效应对侧面分离流的外侧边界没有影响, 尾流宽度不变, 但分离流的内侧边界更加靠近模型. 当厚宽比大于 2.0 时, 阻塞效应使尾流宽度减小. 当厚宽比为 2.0~3.0 时, 阻塞效应使剪切层外侧和内侧边界靠近模型, 导致当厚宽比为 3.0 时, 在模型侧面发生剪切层再附. 当厚宽比大于 3.0 时, 在任何阻塞比下都发生剪切层再附, 阻塞效应导致再附点向上游移动. Takeda 等<sup>[9]</sup>对均匀流中二维矩形柱的研究表明, 当厚宽比为 3 时, 阻塞比将决定剪切层的再附是否发生. 当阻塞比大于 10% 时, 发生再附, 此时随阻塞比的增加不会发生驰振现象. 当厚宽比为 4 时, 在所有阻塞比下都将发生再附, 所以也不会发生驰振. 对于厚宽比为 3 和 4 的模型, 再附点可能随阻塞比增加

而向上游移动. Okajima 等<sup>[20]</sup>在水箱中对矩形柱的研究发现, 对于均匀流中厚宽比为 1 和 2 的矩形柱, 随阻塞比增大, 前缘分离的剪切层将再附. 而对于厚宽比为 3 和 4 的矩形柱, 阻塞效应并不会改变再附的发生.

由以上研究可知, 在均匀流中, 对于二维圆柱, 阻塞效应会改变分离点位置, 使尾流旋涡的横向间距和纵向间距都减小; 对于二维矩形柱, 阻塞效应使侧面分离流更靠近物体, 导致尾流宽度变窄, 尾流中旋涡的横向和纵向间距都减小, 且使旋涡的耗散距离缩短. 此外, 当矩形截面厚宽比为 2~3 时, 阻塞效应会引起分离流再附. 当发生再附时, 阻塞效应会使再附点移向上游, 使再附长度减小. 但阻塞效应对湍流场中模型附近流动影响的研究较少.

### 2.2 风压系数和阻力、升力系数

El-Sherbiny<sup>[21]</sup>研究均匀流中圆柱阻塞效应时指出, 势流区压力没有受到阻塞比影响, 而随着阻塞比增大尾流区压力系数减小, 阻力系数增大, 脉动压力分布规律没有受到影响, 尾流形状也没有明显变化, 流场特性存在相似性. West 等<sup>[15]</sup>对低湍流均匀流中  $Re$  为 1 000~10 000 的二维圆柱进行测压试验研究, 根据压力分布特点, 发现当阻塞比小于 6% 时, 压力分布和阻力系数的阻塞效应很小; 当阻塞比为 6% 到 16% 时, 阻塞效应较为显著和复杂, 压力分布变化. 将圆柱表面按照角度分为 3 个区域: a 区  $0^\circ\sim70^\circ$ , b 区  $70^\circ\sim120^\circ$ , c 区  $120^\circ\sim180^\circ$ . 阻塞效应造成 a 区和 c 区的平均风压幅值变化, 但风压分布形式不会发生改变, 因此该区域平均风压可以用简单的修正方法修正; b 区的风压分布由于分离点位置受阻塞效应影响而变得复杂, 所以简单的修正方法并不适用. Blackburn<sup>[22]</sup>在均匀流水洞中首次研究了阻塞效应对二维圆柱跨度方向风压相关性的影响, 指出增加阻塞比会使跨度方向风荷载的相关性增大.

Noda 等<sup>[23]</sup>在湍流边界层中对风洞地面的二维方柱阻塞效应研究发现, 当阻塞比增大时, 迎风面平均风压影响可忽略, 顶面和背风面平均风压明显减小, 平均阻力系数增大, 平均风压分布规律没有受阻塞比影响. Chakraborty 等<sup>[24]</sup>也指出, 均匀流中当矩形柱与壁面间距离减小时, 迎风面正风压变化很小, 而负压区风压明显减小. Okajima 等<sup>[20]</sup>指出, 均匀流中对于厚宽比为 1 和 2 的矩形柱, 随阻塞比增加, 平均阻力先减小后增大. 阻力减小的原因可能是, 阻塞效应引起了迎风前缘分离的剪切层再附, 导致背风面压力增大, 阻力系数减小. 对于厚宽比为 3 和 4 的

矩形柱,随阻塞比增大阻力系数单调增大. Cigada 等<sup>[25]</sup>指出,在均匀流中,当二维矩形柱与壁面距离小于3倍迎风面边长时,洞壁干扰明显,平均升力系数的影响比平均阻力系数的影响更为严重. 对于厚宽比为3和4的矩形柱,洞壁干扰造成来流的局部加速并产生边界层,限制了旋涡发展. 当模型靠近壁面时,升力功率谱的峰值减小.

谢壮宁等<sup>[26]</sup>对B类风场中阻塞比为0.6%、1.2%、4.9%的低矮房屋标准模型进行测压试验. 结果表明,即使阻塞比为4.9%时,阻塞效应仍将影响低矮建筑表面风压. 在不同风向角下,对于平均风压系数,阻塞比为1.2%的模型与阻塞比为4.9%的模型的比值为0.93~1.07;阻塞比为1.2%的模型与阻塞比为0.6%的模型的比值为0.96~1.04. 对于脉动风压系数,阻塞比为1.2%的模型与阻塞比为4.9%的模型的比值为0.95~1.05,阻塞比为1.2%的模型与阻塞比为0.6%的模型的比值为0.99~1.01. 阻塞比为1.2%的模型与阻塞比为0.6%的模型的结果更为接近,模型的大小对平均风压的影响要比对脉动风压显著. 但笔者认为,数据的差别很可能是由风场比例与试验模型比例不一致引起的.

笔者<sup>[27-30]</sup>在均匀流场中对阻塞比为4.1%、6.1%、8.4%和10.1%的矩形单体高层建筑模型进行测压试验,研究表明阻塞效应对模型迎风面平均风压的影响可以忽略,但对模型侧面、背风面和顶面平均风压以及各个表面的脉动风压影响都较为显著. 阻塞比越大,侧面、背风面和顶面平均风压越小,各个表面的脉动风压越大;随阻塞比增大,建筑的脉动阻力和升力系数均增大,升力系数增幅更为显著.

由上述文献可知,对于二维圆柱,阻塞效应造成分离点位置改变,因而影响侧面风压分布. 迎风面平均风压不受阻塞效应影响,背风面风压随阻塞比增大而减小. 阻塞效应会使沿跨度方向风荷载相关性增大. 对于矩形截面模型,当正对来流时,阻塞效应对模型迎风面平均风压影响较小,模型侧面和背风面平均风压减小,脉动风压增大,平均阻力系数增大. 阻塞效应会引起平均风压和脉动风压分布规律变化,使二维模型沿跨度方向的荷载相关性增大. 由于阻塞效应改变了旋涡脱落的模式,因此会对阻力、升力和扭矩系数的幅值和频谱造成影响.

### 2.3 斯托罗哈数

圆柱斯特劳哈尔数  $Sr$  存在明显的雷诺数效应,并已达达成共识<sup>[31-33]</sup>,但阻塞效应对圆柱  $Sr$  影响的研究很少. West 等<sup>[15]</sup>对均匀流中二维圆柱测压试验发

现,当阻塞比小于6%时,  $Sr$  不受阻塞效应影响;当阻塞比为6%到16%时,  $Sr$  随阻塞比增加而增大. 这主要与分离点位置受阻塞效应影响所致.

阻塞效应对矩形截面结构  $Sr$  的影响还没有被明确认识. Awbi<sup>[19]</sup>指出,对于均匀流中的二维矩形柱,当厚宽比小于2时,阻塞比增大不会造成剪切层的再附,但  $Sr$  增大且厚宽比越小时增幅明显;当厚宽比为2~3时,阻塞效应可能造成剪切层再附,  $Sr$  的变化较为复杂,可能存在“跳跃”,无明显规律;当厚宽比大于3时,任何阻塞比下都发生再附,阻塞比越大  $Sr$  越大. Okajima 等<sup>[20]</sup>也认为均匀流中阻塞效应会使矩形柱的  $Sr$  增大. 对厚宽比为2的矩形柱的升力系数进行频谱分析,得到2个不同峰值,峰值频率分别与流体的分离和再附有关,并且随阻塞比变化峰值发生变化. 当阻塞比较小时,分离涡脱的频率成为升力功率谱的主导频率;当阻塞比较大时,再附着流的频率成为升力功率谱的主导频率. 笔者<sup>[30]</sup>在均匀流场中对厚宽比为2/3的矩形单体高层建筑的研究也发现,阻塞效应将增加  $Sr$ .

由上可知,对于圆柱,阻塞效应将导致  $Sr$  增大. 对于矩形柱,流体的再附与模型的厚宽比有关,因此  $Sr$  的阻塞效应较为复杂. 一般情况下,阻塞比越大  $Sr$  越大.

### 2.4 风致振动

很少有学者在建筑气动弹性模型测振试验中进行阻塞效应的研究. Takeda 等<sup>[9]</sup>通过在均匀流中研究不同阻塞比下二维矩形柱位移响应与风速之间的关系发现:当厚宽比为1和2时,阻塞效应对位移响应的影响较小;当厚宽比为3时,位移响应幅值变化较大,并且当阻塞比为5%时,发生驰振,而当阻塞比大于10%时,驰振消失,随着阻塞比增大,涡致振动的响应幅值逐渐降低;当厚宽比为4时,在任何阻塞比下都不会发生驰振;当厚宽比为3且阻塞比大于10%时,模型前缘的分离流再附,所以在更大的阻塞比下才没有发生驰振. Sharma 等<sup>[34-35]</sup>利用理论建模及数学模拟研究了壁面阻塞效应对均匀流中悬挂物体流固耦合的影响. 将物理模型简化为2个自由度的复合摆,利用数学模拟成功解释了洞壁效应引起的悬挂物体的发散性风致振动.

## 3 阻塞效应的影响因素

### 3.1 模型外形、部位和风向角

如上文所提到的,矩形截面建筑的阻塞效应需

考虑厚宽比的影响。Awbi<sup>[19]</sup>、Takeda等<sup>[9]</sup>、Okajima等<sup>[20]</sup>的研究表明:在均匀流中当矩形截面厚宽比小于2时,阻塞效应不会发生剪切层再附,模型侧面和背风面风压减小,但分布规律不变;当厚宽比大于3时,在任何阻塞比下都会发生再附,模型表面风压的数值和分布规律都将受到阻塞效应影响;当厚宽比为2~3时,剪切层的再附受阻塞比的影响,在这种情况下模型的气动力变化比较复杂。

Utsunomiya等<sup>[36]</sup>对湍流边界层中立方体的研究表明:当阻塞比大于1%时,背风面平均风压就会受阻塞效应影响;在相同阻塞比下,三维立方体的阻塞效应比二维方柱的阻塞效应更严重。

虞心田等<sup>[37]</sup>对均匀流中切角三棱柱进行测压试验,认为当阻塞比增大时,流速增加,模型侧面风吸力增大。由于壁面限制,尾流宽度变小,模型背风面风吸力增强。徐永定等<sup>[38]</sup>指出,对于均匀流中切角三棱柱的平均阻力系数,在相同阻塞比下,矮粗柱体的阻塞效应要比细高柱体的更严重,表面正对来流时的阻塞效应要比切角正对来流时更为严重。同时还指出<sup>[39]</sup>,当三棱柱表面正对来流( $\theta=0^\circ$ )或小偏角( $\theta\leq 30^\circ$ )时,即使阻塞比为20%,迎风面平均压力的阻塞效应也很小,但其他表面阻塞效应较为明显,干扰量最大超过1倍。当三棱柱表面正对来流时,模型下部迎风面驻点附近的压力不受阻塞效应影响,但随高度增加,阻塞比越大压力系数降低越明显,并给出了这一现象的解释:由楼顶强负压向迎风面压力传递作用所致。但笔者认为这主要是由于阻塞效应和三维流效应的共同作用。

模型体型、不同部位和来流方向均会造成不同的阻塞效应。在相同阻塞比下,三维模型的阻塞效应比二维模型的更加严重,矮粗柱体的阻塞效应要比细高柱体的更严重,这是由于三维模型或矮粗柱体的尾流更加宽阔。钝体建筑正对来流时比尖角正对来流时的阻塞效应更加明显。阻塞效应并不能简单认为是由流速的均匀增大引起的,这是因为各表面风荷载的阻塞效应程度不同,且对于三维高层建筑,沿高度方向的阻塞程度也不一致。

### 3.2 来流特性

来流特性对结构风效应有决定性作用,前人对二维模型的研究多采用均匀来流,对三维模型的研究也有采用均匀流和边界层湍流。文献[40-41]指出,在风洞试验条件下,湍流尺度效应对试验结果的影响可忽略,湍流强度对试验结果影响很大。

Jancauskas<sup>[42]</sup>指出,来流湍流度增大将降低阻

塞比对平均阻力系数的影响。徐永定等<sup>[38]</sup>也指出,湍流度增大会降低均匀流中切角三棱柱的阻塞效应。不同风向角下,10.0%湍流度时平均阻力系数的阻塞干扰约为0.2%湍流度时的50%~90%。Utsunomiya等<sup>[36]</sup>指出,由于在均匀流中立方体的尾流比边界层流场中的尾流更宽阔,均匀流中立方体背风面平均风压的阻塞效应要比湍流边界层流场中的大得多,阻塞效应更加显著。Amrouche等<sup>[43]</sup>分别对平滑流、5%和10%湍流度的均匀流中二维矩形柱进行测压试验,指出相比于平滑流,在湍流中阻塞效应不仅造成平均流速增大,还可能使剪切层再附;对于给定的阻塞比,湍流度的增加可能造成模型侧面剪切层再附,且对厚宽比大于1的矩形柱的效果尤为明显;迎风面压力分布受阻塞效应影响很小,分离点平均风压随阻塞比增加而降低,且在不同阻塞比下侧面和背风面压力分布规律发生变化。

来流湍流的增大将抑制阻塞效应。主要原因是,来流湍流增大时,建筑尾流宽度变窄,阻塞效应对流场的干扰减弱。在湍流边界层流场中,对于低矮建筑,迎风面风荷载受阻塞效应影响较小,其他表面风荷载受阻塞效应较大;对于高层建筑,包括迎风面在内的各个表面的风荷载都将受到阻塞效应的影响。此外,还需要进一步研究湍流边界层中实际建筑的阻塞效应。

### 3.3 建筑数量及布置方式

实际建筑的周边情况各不相同,周边建筑的数量和布置方式对阻塞效应会有不同影响。Utsunomiya等<sup>[36]</sup>对均匀流中串列布置的2个二维矩形柱的阻塞效应进行研究,根据间距将流动状态分成3类。A类,间距较小,上柱分离流在下柱侧面再附或者包围下柱。双柱流态类似于单体。上柱背风面平均风压与下柱迎风面平均风压接近。B类,间距较大,上柱分离流在两柱间发展。相比于A类,B类的上柱和下柱背风面平均风压减小,下柱迎风面平均风压增大。C类,双柱间距在A类和B类之间,流态在A类和B类之间间歇变化。这时下柱的迎风面和背风面平均风压出现2个数值。对于A类和B类,随着阻塞比增大,双柱的平均阻力系数绝对值增大。对于A类,上柱和下柱背风面的阻塞效应与单柱的相同。对于B类,下柱迎风面和背风面都受阻塞比影响,下柱平均阻力系数受阻塞效应比上柱更大。对于上柱,不同间距的阻塞效应比较接近。对于下柱,在A类中,间距越大阻塞效应越大;在B类中,间距越大阻塞效应越小。

Jiang 等<sup>[44]</sup>用数值模拟研究了均匀流中串列布置的 2 个二维圆柱的壁面效应,并指出当壁面间距增大时,2 个柱体的平均阻力系数都减小,  $S_r$  也减小. 2 个圆柱串列布置时存在临界间距,使旋涡脱落模式在单体脱落和联合脱落之间转变. 当间距较窄时,壁面对流体有很强的推挤作用,导致在上游柱体后形成的旋涡对提前脱落,所以在 2 个圆柱之间形成旋涡所需要的最小间距更小,壁面间距越大,2 个圆柱之间的临界间距越大.

王磊等<sup>[45]</sup>对 C 类风场中 2 种缩尺比的群体高层建筑进行测压试验,指出群体建筑阻塞效应比单体建筑阻塞效应复杂得多,周边建筑高度不同,将影响沿高度方向的阻塞程度. 不同的周边建筑也将使群体建筑阻塞效应的机理更加复杂. 阻塞效应对目标建筑侧面风压的影响最大,并改变了风压分布,在阻塞效应下迎风面部分位置甚至出现负压.

综上所述,对于群体建筑,上游建筑分离的旋涡将对下游建筑产生影响. 阻塞效应对上游建筑和下游建筑风荷载的影响较为复杂,与建筑的数量、外形、布置形式和建筑间距都有关,但目前对于群体建筑阻塞效应的研究还远远不够.

## 4 阻塞效应修正方法

### 4.1 基于试验的修正公式

在航空和汽车领域,风洞试验阻塞效应的理论修正发展得比较成熟<sup>[1]</sup>,但并不适用于建筑结构阻塞效应的修正,其原因是:①建筑外形多为钝体,尾流较宽;飞机和汽车的外形多为流线体,尾流较窄. ②建筑在大气边界层中的流场具有风剖面,湍流较大,且空气流速要远低于声速,并认为是不可压缩流;飞机和汽车处于均匀流场,湍流很小,且空气的相对流速要远大于建筑承受的风速,甚至超过声速,认为是可压缩流. ③建筑具有特定周边,存在复杂的绕流;飞机和汽车试验为单体模型.

Maskell<sup>[46]</sup>根据动量定理开创性地研究带有固定分离点的钝体流场的阻塞效应,提出了半经验的修正理论,其基本假定为:①压力分布不变;②阻塞效应可等效为自由流速的增大;③分离区的背风面压力系数为常数,且与尾流边界的压力系数相等;④尾流在较远的下游处趋向于轴对称. 经过推导,Maskell 给出了适用于低湍流均匀流中垂直于来流的平板,并且形式较为简单的阻力系数修正公式,如下所示:

$$\frac{C_D}{C_{D,c}} = 1 + \frac{\Delta q}{q} = 1 + \epsilon C_{D,c} \frac{a_s}{a} \quad (1)$$

式中:  $C_D$  为试验测得的阻力系数,  $C_{D,c}$  表示修正后的量;  $\Delta q$  为未扰动流中动压的增加,  $q$  为参考动压;  $a_s$  为物体流线方向的投影面积;  $a$  为风洞的横截面积;  $\epsilon$  为系数,当平板的长宽比为 1~10 时,  $\epsilon$  约为 5/2,且变化很小. 虽然 Maskell 理论得到试验结果验证,但仍存在如下缺陷:①理论上该方法仅适用于安装在风洞中心高度处平板的平均阻力修正;②仅考虑了尾流阻塞效应,没有考虑实体阻塞效应;③将阻塞效应的修正简单等效成模型周围流速的增加,与实际不符.

一些学者发展了 Maskell 理论,扩大了其适用范围;也有学者对 Maskell 理论的基本假定质疑,提出了新公式. Niemann<sup>[47]</sup>发现 Maskell 理论适用于边界层高度较小时正交于来流的风洞地面上的物体. Takeda 等<sup>[9]</sup>试验验证了 Maskell 理论适用于平板、矩形截面、多孔体、格构式和六边形断面模型. Modi 等<sup>[48]</sup>、Courchesne 等<sup>[49]</sup>指出 Maskell 理论适用的阻塞比范围为 5%~10%. 为提高 Maskell 理论的阻塞比范围的适用性, Sprosson 等<sup>[50]</sup>、Gould<sup>[51]</sup>建议使用高阶表达式来提高 Maskell 方法的适用性. Modi 等<sup>[48]</sup>基于阻塞比大于 10.0% 的圆柱和平板的试验结果得到拟合公式,并在最大为 35.5% 的阻塞比下进行验证,修正公式如下所示:

$$\frac{C_D}{C_{D,c}} = 1 + \sum_{i=1}^n A_i \left( C_D \frac{a_s}{a} \right)^i \quad (2)$$

其中,参数  $A_i$  通过试验数据拟合得到,  $i$  为阶数.

Awbi<sup>[19]</sup>对 Maskell 方法进行修正,考虑厚宽比影响,提出了低湍流度均匀流中最大阻塞比为 25% 时方柱的平均阻力系数修正公式,如下所示:

$$\frac{C_D}{C_{D,c}} = 1 + K_D C_{D,c} \frac{a_s}{a} \quad (3)$$

$$K_D = \frac{\chi}{-C_{pb}} \quad (4)$$

式中:  $K_D$  为系数;  $C_{pb}$  为模型背风面平均风压系数;  $\chi$  为形状因子,与矩形柱的厚宽比  $d/h$  有关,可由试验结果拟合得到. 当  $0 < d/h \leq 0.5$  时,  $\chi = 1.11 + 0.94(d/h)$ ; 当  $1 < d/h \leq 5$  时,  $\chi = 1.11 - 0.14(d/h)$ .

Utsunomiya 等<sup>[36]</sup>分别对立方体、矩形柱、串列布置的 2 个矩形柱的阻力系数修正,以 Maskell<sup>[46]</sup>和 Awbi<sup>[19]</sup>方法为基础,考虑了 3 个方面的影响:①串列布置钝体的间距;②三维流效应;③来流特性.

对于单体和串列矩形柱,阻力系数的修正如下

所示:

$$K_D = \frac{\alpha\gamma}{-C_{pb}} \quad (5)$$

式中: $\alpha$ 为间距因子,与矩形柱的间距比 $L/h$ 有关, $L$ 为矩形柱的间距.单体矩形柱 $\alpha=1$ .串列布置的上游矩形柱,当 $0 < L/h \leq 3.0$ 时, $\alpha=2-0.3(L/h)$ ;当 $3.5 \leq L/h \leq 5.0$ 时, $\alpha=0.3(L/h)$ .串列布置的下游矩形柱,当 $0 < L/h \leq 3.0$ 时, $\alpha=-3+10(L/h)$ ;当 $3.5 \leq L/h \leq 5.0$ 时, $\alpha=16-2(L/h)$ .可以发现,单体建筑或串列布置的上游建筑的阻塞效应较小,下游建筑的阻塞效应较为显著;间距比对上游建筑影响较小,而对下游建筑的影响较大;当间距比不大于3.0时,随着间距比的增大,阻塞效应增大明显;当间距比为3.5~5.0,随着间距比的增大,阻塞效应有所减小.

对于立方体阻力系数的修正如下所示:

$$K_D = \frac{\alpha\beta\gamma}{-C_{pb}} \quad (6)$$

式中: $\beta$ 为高宽比因子,当模型为二维时, $\beta=1$ ,当模型为三维时, $\beta=1.8$ ; $\gamma$ 为来流特性因子,当来流为均匀来流时, $\gamma=1$ ,当来流为边界层湍流时, $\gamma=0.5$ .可以发现,三维流效应会增大阻塞效应,来流湍流会降低阻塞效应.

Raju等<sup>[52]</sup>基于试验结果提出了如下指数形式的公式来估计二维矩形柱的阻塞效应:

$$C_{D,c} = C_D \left(1 - \frac{a_s}{a}\right)^m \quad (7)$$

式中: $m$ 为由不同试验模型得到的经验参数,以形状参数(厚宽比)作为函数.此外,还验证了所提出的修正公式不仅适用于均匀流中的二维三角柱和圆板,还适用于修正边界层中物体的阻塞效应.

Laneville等<sup>[53]</sup>提出了修正平滑流和湍流中二维方柱平均压力系数和阻力系数的经验方法.考虑了长细比、阻塞比、截面厚宽比和湍流强度,公式形式如下所示:

$$\frac{C_{D,c}}{C_D} = 1 + \left(\frac{l}{h}\right)^{-\frac{0.05}{a_s/a}} - \xi\left(\frac{a_s}{a}\right)^{1.4} \quad (8)$$

$$\xi = \xi_{sf} + \Delta\xi \quad (9)$$

$$\Delta\xi = 6I\left(\frac{d}{h}\right) \quad (10)$$

式中: $\xi_{sf}$ 为平滑流中得到的结果,是高宽比 $l/h$ 的函数; $\Delta\xi$ 是考虑了湍流强度的修正值; $I$ 为湍流强度.该经验公式适用于阻塞比不大于15%的情况.

笔者<sup>[29]</sup>根据均匀流中矩形高层建筑测压试验结果提出了如下形式的平均阻力修正公式:

$$C_D = C_{D,c} \frac{1}{\left(1 - k \frac{a_s}{a}\right)^2} \quad (11)$$

式中: $k$ 为系数,表征阻塞效应的程度,由试验结果拟合得到.

上述阻塞效应修正公式都是关于平均阻力系数的修正,几乎没有涉及其他方面.仅有 Blackburn<sup>[22]</sup>在水洞中研究了阻塞效应对圆柱跨度方向荷载相关性的影响,拟合了不同阻塞比下跨度方向压力相关系数公式,如下所示:

$$\rho(\lambda) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi}{2\mu}\right)^2 \lambda^2} \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{|z_1 - z_2|}{D} \quad (13)$$

$$\mu = \int_0^\infty \rho(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

式中: $\lambda$ 为量纲一距离; $\rho(\lambda)$ 为距离为 $\lambda$ 处荷载的相关系数; $D$ 为圆柱直径; $z_1$ 和 $z_2$ 分别为圆柱跨度方向的坐标.

由上可见,阻塞效应修正方法多采用试验结果的拟合方法.众多学者分别提出了针对平均阻力系数的阻塞效应修正公式,修正方法中所考虑的参数鲜有相同,修正公式中的经验因子也不统一.除了 Maskell 方法外,并没有被广泛认可的阻塞效应修正理论和方法,且 Maskell 方法也存在明显缺陷.所提出的阻塞效应修正方法大多对来流动压修正,认为平均风压分布形状没有变化.事实上,模型侧面和背面的平均风压分布形式会产生较大的变化,不同工况中来流情况、模型外形和尺寸、风洞截面等因素都将影响修正公式的适用性.此外,对平均风压、脉动风力、脉动风压、荷载相关性等方面也需要进行修正公式的研究.

#### 4.2 基于数值模拟的修正

与风洞试验对比,计算流体力学(CFD)的优势在于:①花费小和快速;②足尺实际建模;③可获得空间和时间方面的详细信息.

众多学者(Stafford<sup>[54]</sup>、Chakraborty等<sup>[14]</sup>、Davis等<sup>[55]</sup>、Okajima等<sup>[17]</sup>、Patil等<sup>[18]</sup>)利用CFD技术来研究阻塞效应. Yang等<sup>[56]</sup>建议用以下2个公式来修正风洞试验中的平均阻力系数阻塞效应:

$$\Delta C_{D, \text{Expt}} = \Delta C_{D, \text{CFD}} \quad (15)$$

$$C_{D, c} = C_{D, \text{Expt}} - \Delta C_{D, \text{CFD}} \quad (16)$$

其中,第1个公式认为数值风洞中阻塞效应造成的平均阻力系数变化 $\Delta C_{D, \text{CFD}}$ 与风洞试验中的平均阻

力系数变化  $\Delta C_{D, \text{Expt}}$  相等;第2个公式中将风洞试验测得的平均阻力系数  $C_{D, \text{Expt}}$  减去相同条件下数值风洞中阻塞效应引起的平均阻力系数变化量  $\Delta C_{D, \text{CFD}}$  得到修正后的结果。

由上述可知,试验方法是修正阻塞效应的最主要手段,数值模拟作为一种辅助方法也可用于阻塞效应平均风荷载的修正。除此之外,由于实壁风洞和开口自由射流风洞中阻塞效应相反,用开槽壁面来调整阻塞效应的想法应运而生。一些学者(Parkinson 等<sup>[11, 57-58]</sup>、Kong 等<sup>[59]</sup>、Glanville 等<sup>[60]</sup>、Broughton 等<sup>[61]</sup>) 在开槽壁面风洞的设计和建造方面进行研究。但由于经济性和适用性方面的限制,目前在建筑风洞方面几乎没有采用开槽壁面消除阻塞效应的实例。

## 5 重要文献中对阻塞比的规定

一般规定,阻塞比控制在5%以内可忽略试验的阻塞效应<sup>[2-8]</sup>。美国土木工程学会编制的《Wind tunnel studies of buildings and structures》<sup>[8]</sup>中指出:当阻塞比小于5%时,建筑结构模型风洞试验阻塞效应很小可忽略;当阻塞比为5%~10%时,阻塞效应将较严重,必须修正;当阻塞比大于10%时,试验结果有效性必须通过小缩尺比模型来验证。类似地,《建筑工程风洞试验方法标准》<sup>[62]</sup>中规定,在实际风洞中阻塞比宜小于5%,最大不应超过8%。对于开口试验段风洞阻塞比的指标可适当放宽。在计算阻塞比时,用模型的最大投影面积除以试验段横截面面积。在以上文献中,没有区分单体建筑与群体建筑的不同情况,且没有考虑群体建筑中的周边布置方式不同对阻塞效应带来的影响。当阻塞比小于5%时,结构风工程研究人员认为可忽略阻塞效应,但这一指标对于不同试验目的和条件(例如,对于钝体空气动力学基础研究、单体建筑或群体建筑、不同类型的风场条件等)的适用性和精细化的修正仍然值得深入研究。

## 6 结语

当前建筑结构模型风洞试验阻塞效应的研究还不够深入细致,风工程研究人员对这一基础问题的重视也不足。为此,提出以下今后值得研究的方向:

(1) 阻塞效应研究应更加切合实际、更加系统化。例如,研究大气边界层风场中三维建筑的阻塞效

应;研究不同体型高层建筑,不同截面厚宽比、建筑高宽比、截面角部处理(切角、凹角、倒圆角)的矩形截面建筑的阻塞效应;研究典型布置的群体建筑阻塞效应。

(2) 随着计算机技术的发展和湍流模型的不断完善,CFD 是研究钝体建筑阻塞效应的有力工具。

(3) 开展气动弹性模型试验的阻塞效应研究,深入探究阻塞比对建筑涡激振动的影响,揭示阻塞效应机理。

(4) 从钝体空气动力学理论入手,结合试验结果,提出适用性更广、精度更高的阻塞效应修正公式。

## 参考文献:

- [1] 程厚梅. 风洞实验干扰与修正[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.  
CHENG Houmei. Wind tunnel experiment interference and correction [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.
- [2] Hunt A. Wind-tunnel measurements of surface pressures on cubic building models at several scales[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1982, 10(2): 137.
- [3] Kubo Y, Miyazaki M, Kato K. Effects of end plates and blockage of structural members on drag forces[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1989, 32(3): 329.
- [4] Holmes J D. Wind loading of structures[M]. New York: Taylor & Francis, 2001.
- [5] 日本风洞实验指南研究委员会. 建筑风洞实验指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Japan Research Committee of Guide for Wind Tunnel Experiment. Guide for building wind tunnel experiment[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [6] 黄本才, 汪从军. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2008.  
HUANG Bencai, WANG Congjun. Analysis principle and application of structural wind resistance[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2008.
- [7] Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures[M]. Hoboken: Wiley, 1996.
- [8] Cermak J E, Isyumov N. Wind tunnel studies of buildings and structures[S]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 1999.
- [9] Takeda K, Kato M. Wind tunnel blockage effects on drag coefficient and wind-induced vibration[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 42(1/3): 897.
- [10] Pankhurst R C, Holder D W. Wind tunnel technique[M]. 1st ed. London: Pitman and Sons Limited, 1952.
- [11] Parkinson G V, Kong L, Cook N J. Configuration criteria for a blockage-tolerant wind tunnel[J]. Journal of Wind Engineering



- and Industrial Aerodynamics, 1992, 40(2): 215.
- [12] Sahini D. Wind tunnel blockage corrections; a computational study[D]. Lubbock: Texas Tech University, 2004.
- [13] Rosenhead L, Schwabe M. An experimental investigation of the flow behind circular cylinders in channels of different breadths[J]. Proceedings of the Royal Society of London: Series A, 1930, 129(809): 115.
- [14] Chakraborty J, Verma N, Chhabra R P. Wall effects in flow past a circular cylinder in a plane channel: a numerical study [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2004, 43(12): 1529.
- [15] West G S, Apelt C J. The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers between 104 and 105[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 114: 361.
- [16] Cherry N J. The effects of stream turbulence on a separated flow with reattachment[D]. London: University of London, 1982.
- [17] Okajima A, Yi D, Sakuda A, *et al.* Numerical study of blockage effects on aerodynamic characteristics of an oscillating rectangular cylinder [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 67/68: 91.
- [18] Patil P P, Tiwari S. Effect of blockage ratio on wake transition for flow past square cylinder[J]. Fluid Dynamics Research, 2008, 40(11/12): 753.
- [19] Awbi H B. Wind-tunnel-wall constraint on two-dimensional rectangular-section prisms[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1978, 3(4): 285.
- [20] Okajima A, Yi D, Kimura S, *et al.* The blockage effects for an oscillating rectangular cylinder at moderate Reynolds number [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 69/71: 997.
- [21] El-Sherbiny S E. Effect of wall confinement on the aerodynamics of bluff bodies[D]. Vancouver: University of British Columbia, 1972.
- [22] Blackburn H M. Effect of blockage on spanwise correlation in a circular cylinder wake[J]. Experiments in Fluids, 1994, 18 (1/2): 134.
- [23] Noda M, Utsunomiya H, Nagao F. Basic study on blockage effects in turbulent boundary layer flows[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 54/55: 645.
- [24] Chakraborty D, Brahma R K. Effect of wall proximity in fluid flow and heat transfer from a rectangular prism placed inside a wind tunnel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(3/4): 736.
- [25] Cigada A, Malavasi S, Vanali M. Effects of an asymmetrical confined flow on a rectangular cylinder[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006, 22(2): 213.
- [26] 谢壮宁,刘帅,石碧青. 低矮房屋标准模型的风洞试验研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2011, 39(6): 106.
- XIE Zhuangning, LIU Shuai, SHI Biqing. Investigation into wind tunnel test of standard low-rise building model [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(6): 106.
- [27] 黄剑,顾明,全涌. 矩形高层建筑阻塞效应的试验研究[C]//第十六届全国结构风工程学术会议暨第二届全国风工程研究生论坛. 成都:中国土木工程学会, 2013: 389-390.
- HUANG Jian, GU Ming, QUAN Yong. Experimental investigation of blockage effects on rectangular tall buildings [C]//Proceedings of 16th National Conference on Structural Wind Engineering & 2nd National Forum on Wind Engineering for Graduate Students. Chengdu: China Civil Engineering Society, 2013: 389-390.
- [28] 黄剑,顾明. 均匀流中矩形高层建筑脉动风压的阻塞效应试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(12): 28.
- HUANG Jian, GU Ming. Tests for blockage effects of fluctuating wind pressure on a rectangular tall building in uniform flow[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33 (12): 28.
- [29] 黄剑,顾明. 均匀风场中高层建筑平均风力的阻塞效应[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2014, 42(6): 853.
- HUANG Jian, GU Ming. Experimental investigation of blockage effects on mean wind forces on tall buildings in uniform flow [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(6): 853.
- [30] 顾明,黄剑. 均匀风场中矩形高层建筑脉动风力阻塞效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(10): 122.
- GU Ming, HUANG Jian. Experimental investigation of blockage effects on fluctuating wind forces on rectangular tall buildings in uniform wind flow [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(10): 122.
- [31] Bearman P W. On vortex shedding from a circular cylinder in the critical Reynolds number regime [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 37(3): 577.
- [32] Achenbach E, Heinecke E. On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds numbers  $6 \times 10^3$  to  $5 \times 10^6$  [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 109: 239.
- [33] Schewe G. On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 133: 265.
- [34] Sharma S, Raghav V, Komerath N, *et al.* Wall effect on fluid-structure interactions of a tethered bluff body[J]. Physics Letters A, 2013, 377(34/36): 2079.
- [35] Sharma S, Raghav V, Komerath N, *et al.* Efficient modeling of dynamic blockage effects for unsteady wind tunnel testing [C]//The AHS 69th Annual Forum. Phoenix: The American Helicopter Society International Inc., 2013.
- [36] Utsunomiya H, Nagao F, Ueno Y, *et al.* Basic study of blockage effects on bluff bodies [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 49 (1/3): 247.
- [37] 虞心田,施岳定,傅光明,等. 三角形高层建筑相邻干扰的实验研究[J]. 空气动力学学报, 1987, 5(3): 278.
- YU Xintian, SHI Yueding, FU Guangming, *et al.* Experiments on the interference between two high-rise buildings with triangle cross section[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1987, 5 (3): 278.
- [38] 徐永定,吕录勋. 切角三角形柱体模型的洞壁阻塞干扰研究[J]. 气动实验与测量控制, 1987, 1(2): 21.
- XU Yongding, LÜ Luxun. Wind tunnel wall blockage effects on corner cut triangular prisms[J]. Aerodynamic Experiment and Measurement & Control, 1987, 1(2): 21.
- [39] 徐永定,吕录勋. 多角柱体表面压力洞壁阻塞干扰的试验研究

- [J]. 气动实验与测量控制, 1989, 3(3): 21.
- XU Yongding, LÜ Luxun. Wind tunnel wall blockage effects on pressure distributions of hexagonal prisms[J]. *Aerodynamic Experiment and Measurement & Control*, 1989, 3(3): 21.
- [40] Nakamura Y, Ohya Y. The effects of turbulence intensity and scale on the mean flow past square rods[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 11(1/3): 421.
- [41] Laneville A. Turbulence and blockage effects on two dimensional rectangular cylinders [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33(1/2): 11.
- [42] Jancauskas E D. The drag on two-dimensional rectangular cylinder in smooth flow and turbulence[D]. Townsville: James Cook University, 1984.
- [43] Amrouche N, Dizene R, Laneville A. Observations of the wind tunnel blockage effects on the mean pressure distributions around rectangular prisms in smooth and grid turbulent flows [C]// SMEE'10. Bou Ismail: Revue des Energies Renouvelables, 2010: 21-26.
- [44] Jiang R, Lin J. Wall effects on flows past two tandem cylinders of different diameters[J]. *Journal of Hydrodynamics: Series B*, 2012, 24(1): 1.
- [45] 王磊, 梁枢果, 邹良浩, 等. 阻塞效应对高层建筑风洞试验的影响分析[J]. *实验力学*, 2013, 28(2): 261.
- WANG Lei, LIANG Shuguo, ZOU Lianghao, *et al.* Investigation on blockage effect of high-rise building in wind tunnel experiment [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(2): 261.
- [46] Maskell E C. A theory for the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel[R]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1963.
- [47] Niemann H. The boundary layer wind tunnel: an experimental tool in building aerodynamics and environmental engineering [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 48(2/3): 145.
- [48] Modi V J, El-Sherbiny S. Effect of wall confinement on aerodynamics of stationary circular cylinders[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Tokyo: International Conference on Wind Engineering, 1971:365-375.
- [49] Courchesne J, Laneville A. A comparison of correction methods used in the evaluation of drag coefficient measurements for two-dimensional rectangular cylinders[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1979, 101(4): 506.
- [50] Sprosson P F, Brown C M. A study of blockage effects on flat plates in a closed wind tunnel[R]. Bristol: University of Bristol, 1965.
- [51] Gould R. Wake blockage corrections in a closed wind tunnel for one or two wall-mounted models subject to separated flow[M]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1969.
- [52] Raju K G R, Singh V. Blockage effects on drag of sharp-edged bodies [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1975, 1(3): 301.
- [53] Laneville A, Trepanier J Y. Blockage effects in smooth and turbulent flows: the case of two-dimensional rectangular cylinders[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1986, 22(2/3): 169.
- [54] Stafford L G. A streamline wind-tunnel working section for testing at high blockage ratios[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1981, 9(1/2): 23.
- [55] Davis R W, Moore E F, Purtell L P. A numerical-experimental study of confined flow around rectangular cylinders [J]. *Physics of Fluids*, 1984, 27(1): 46.
- [56] Yang Z, Schenkel M, Fadler G J. Corrections for the pressure gradient effect on vehicle aerodynamic drag [J]. *SAE Transactions*, 2003, 112(6): 951.
- [57] Parkinson G V, Hameury M. Performance of the tolerant tunnel for bluff body testing[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33(1/2): 35.
- [58] Parkinson G V, Cook N J. Blockage tolerance of a boundary-layer wind tunnel [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 42(1/3): 873.
- [59] Kong L, Parkinson G V. Road vehicle model testing in a blockage tolerant wind tunnel[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 57(2/3): 137.
- [60] Glanville M J, Kwok K. Further investigation of the blockage-tolerant wind tunnel technique [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 69/71: 987.
- [61] Broughton C A, Rainbird W J, Kind R K. An experimental investigation of interference effects for high blockage bluff bodies in a slotted-wall wind tunnel test section[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 56(1): 23.
- [62] 中国建筑科学研究院. JGJ/T 338—2014 建筑工程风洞试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- China Academy of Building Research. JGJ/T 338—2014 Standard for wind tunnel test of buildings and structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.