

开合屋盖体育场风荷载特性试验研究

李寿科, 李寿英, 陈政清

(湖南大学 风工程试验研究中心, 湖南长沙 410082)

摘要: 建筑立墙迎风面开口时内部风压随开口处外压变化显著, 使得屋盖所受净压显著增大, 其测量值往往大于规范取值。而对于屋盖顶部开孔的建筑, 其内部风荷载我国规范没有相应取值。为了进行开合屋盖结构设计和探讨屋盖顶部开孔对屋盖风荷载变化的影响, 以 1:300 的几何缩尺比制作了一个开合屋顶体育场的刚性模型, 在 B 类地貌中对该体育场固定、活动屋盖的上、下表面进行了风洞测压试验, 得到了屋盖上下表面的体型系数、平均风压系数、脉动风压系数和极值风压系数。试验结果表明: 活动屋盖的开启, 可有效减小固定屋盖和活动屋盖的平均风荷载, 引发整个结构承受向下的风荷载; 活动屋盖开启将增大固定屋盖和活动屋盖的净脉动风荷载; 活动屋盖开启将减小固定屋盖和活动屋盖的极小值风荷载, 且固定屋盖上的最大极小值风压系数的位置往屋顶开口方向移动。

关键词: 大跨度钢结构; 活动屋盖; 风洞试验; 风压系数; 体型系数

中图分类号: TU 393.3 TU 312.1 TU 317.1 **文献标志码:** A

Experimental investigation on wind loading of a stadium with a retractable roof

LI Shouke, LI Shouying, CHEN Zhengqing

(Wind Engineering Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract In the case of a building with a dominant windward opening, the internal pressure closely follows the external pressure at the opening, and the net roof pressures will be increased significantly, which were normally larger than those derived from some codes. Currently, for the structures with openings on the roofs, the internal wind pressure values were not provided in Chinese code. For the aim of structural designing as well as for the purpose of studying the effects of the wind loads on the main roof with retractable roof's opening, a rigid test model of a stadium with retractable roof was built with geometrical scale of 1:300. Wind tunnel tests were carried out to measure the wind pressures on the fixed roof and the retractable roof in turbulence flow. The characteristics of shape coefficient, mean wind pressure coefficient, fluctuating wind pressure coefficient and extreme wind pressure coefficients on the fixed roof and retractable roof were particularly studied. It is shown that retractable roof's opening reduces the mean wind loads on both the fixed and retractable roof greatly, and will make the main roof experienced positive pressures. In the case of retractable roof opening, the fluctuating wind loads of the fixed roof and retractable roof are increased, which compared to that of the closed case. For the retractable roof in opened condition, the extreme wind loads on both fixed and retractable roof will be decreased, and the maximum extreme wind loads will be present at the top opening of the fixed roof.

Keywords large-span steel structure; retractable roof; wind tunnel test; wind pressure coefficient; shape coefficient

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50708035), 中国博士后科学基金项目 (20060400873)。

作者简介: 李寿科 (1981—), 男, 江西萍乡人, 博士研究生。Email: 32090170@163.com

通讯作者: 李寿英 (1977—), 男, 江西萍乡人, 工学博士, 副教授。Email: shyl@hnu.cn

收稿日期: 2009 年 7 月

0 前言

开合屋盖大跨度体育场可满足多种气候和大容量观众的需求,活动屋盖关闭时体育场结构内部风压为零,活动屋盖的开启则会引起结构内部较大的风压,从而对屋盖风荷载造成较大的影响。开合屋盖大跨度体育场属于一种开孔结构,对于开孔结构内部风效应的研究国外开展较早, Holmes^[1]对一立墙开孔的双坡低矮房屋进行了风洞试验,研究了内压脉动响应和风洞试验模型应有的正确体积缩尺比,并推导了内压响应可由 Helmholtz 共振方程表示。Li^[2]研究了一矩形建筑立墙迎风面突然开孔时内压的变化,发现内压稳态振动要比瞬态振动更加地显著。Vickery^[3]在基于伯努利方程假设的基础上研究了开孔建筑的内、外风压特性,建立了内压响应的 Helmholtz 方程,但没有进行现场实测和风洞试验验证。Woods^[4]研究了一矩形模型在多种开孔大小情况下的内部风效应。Shama^[5]对一缩尺比为 1:50 的 Texas Tech University (TTU) 建筑进行了风洞试验,研究内压响应方程及柔度对内压响应的影响。Pearce^[6]对一多种内部容积及多种屋盖柔度的立墙开孔圆柱形建筑进行了风洞试验研究,结果表明:内压响应的 Helmholtz 频率随内部容积和屋盖柔度的增大而减小。Ginger^[7]对全尺寸的 TTU 建筑在迎风面开孔时进行了实测研究,结果表明在屋盖的迎风面边缘的净压值大于澳洲规范的给定值。国内学者,卢旦等^[8]对开孔结构瞬时内压响应进行了最大净风压的估算。余世策等^[9]采用了矩形刚性模型进行了开孔结构风洞试验,研究了结构内部的平均和脉动风压系数,其开孔位置为立墙的迎风面。余世策等^[10]还通过气弹模型风洞试验研究了 Helmholtz 频率对开孔建筑屋盖风致响应的影响。黄鹏等^[11]研究了大跨度屋盖顶部开洞后的风荷载特性,研究表明屋盖开洞后屋盖上的风压有一定程度的降低。

已有的研究成果主要基于立墙开孔的矩形建筑,研究建筑内外风压特性和内压动态响应规律以及屋盖柔度对建筑内压动态响应的影响,得到了对于立墙开孔建筑的内压动态响应可由 Helmholtz 共振方程来表示的结论,并通过试验研究发现屋盖净压在立墙迎风面开孔时均有不同程度的增加。

本文以顶部开孔的椭圆形开合屋盖大跨度体育场为研究对象,研究活动屋盖开启和关闭时屋盖风荷载特性,分析活动屋盖的开启对固定屋盖和活动屋盖的总体型系数、平均风压系数、脉动风压系数、极小值风压系数的影响,探讨屋盖开孔时屋盖的净压变化规律。

1 试验概况

1.1 工程背景

以内蒙古鄂尔多斯东胜体育场为工程背景,该体育场屋盖由活动屋盖和固定屋盖组成,平面为椭圆形,长轴 270m、短轴 220m,中心具有一长 106m、宽 80m 的矩形开孔,屋盖最高点标高为 60m。活动屋盖位于屋盖的中心区,长 135m、宽 86m,活动屋盖可以关闭和开启。活动屋盖包括对称的两部份,开启时两部份分别向两侧滑移,与固定屋盖重合,其开合位置如图 1 所示,且固定屋盖和活动屋盖之间的竖向标高间距 1.5m。整个屋盖由周边支座、横跨屋盖长轴的巨拱共同支撑,屋盖通过拉索悬吊在巨拱上。其中巨拱跨度 315m,顶部最高点 130m。另外体育场还包括一座裙房,其屋盖标高低于主屋盖标高。图 1 给出了内蒙古鄂尔多斯东胜体育场平面示意图。本文仅研究活动屋盖开启对主屋盖风荷载的影响。

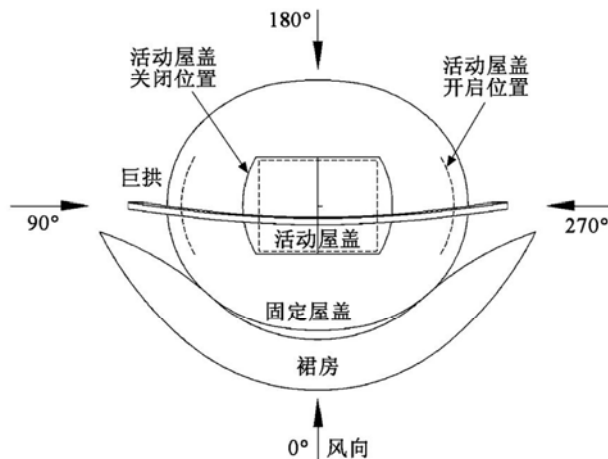


图 1 体育场平面示意图及风向角定义

Fig 1 Plan sketch and wind direction angle of stadium

1.2 试验模型

试验在湖南大学 HD-2 风洞实验室的高速试验段进行。试验模型采用有机玻璃制作,模型与实际结构在外形上保持几何相似,缩尺比为 1:300。试验模型照片见图 2。在固定屋盖和活动屋盖上共布置 408 个测点,其中上、下表面各 204 个,上、下表面测点位置对应,测点布置见图 3。试验中参考高度为 50m,相当于实际高度 150m。

1.3 试验工况

风洞试验包括活动屋盖关闭和开启 2 个工况。需要说明的是,鄂尔多斯东胜体育场的立墙有 16.4% 的开孔(图 2),本文不考虑立墙开孔的影响,故试验时采用透明胶布将立墙开孔密封。风洞试验的风向角定义见图 1,风向角间隔 10°,2 个工况共 72 个风向角。采样时长 20s,采样频率 330Hz。

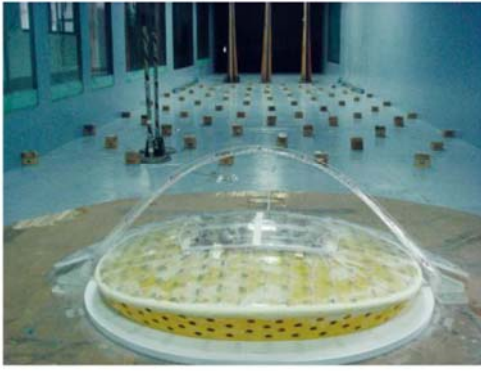
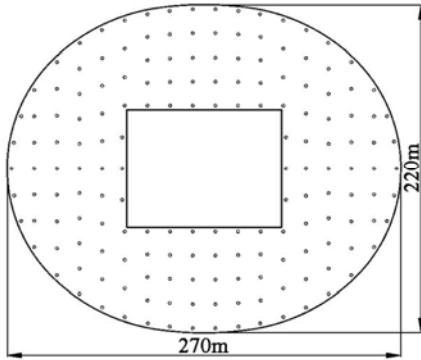
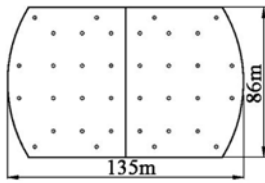


图 2 试验模型照片

Fig 2 Typical view of model test in BLWT



(a) 固定屋盖



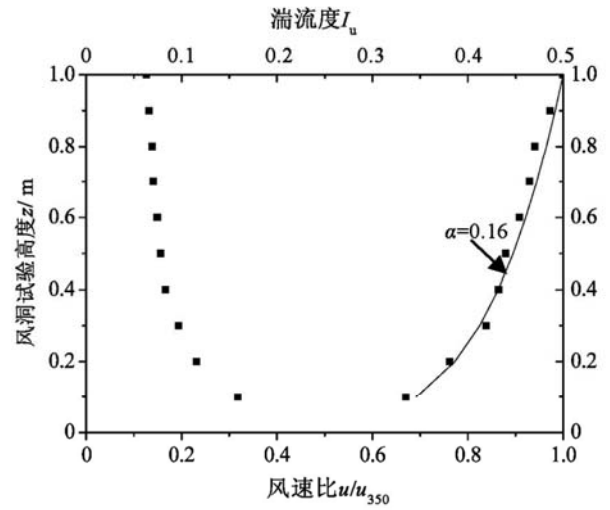
(b) 活动屋盖

图 3 测点布置图

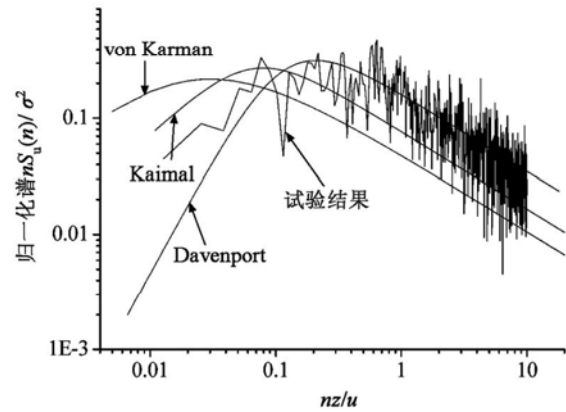
Fig 3 Pressure port locations

1.4 风场模拟

鄂尔多斯东胜体育场周边地形与 GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》的 B 类地貌类似, 在 HD-2 风洞实验室的高速试验段模拟了 B 类地貌风场, 转盘中心处的平均风速剖面、湍流度剖面 and 50cm 高处的顺风向脉动风谱见图 4。图 4a 中的实线为 GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》规定的 B 类风场理论平均剖面, 离散点为试验得到的平均风速和湍流度剖面。从图 4a 可以看出, 风洞中模拟的平均风速



(a) 平均风速和湍流度剖面



(b) 顺风向脉动风谱

图 4 风洞中大气边界层的模拟

Fig 4 Simulation of wind characteristics in BLWT

$$C_{pi}(t) = \frac{P_i(t) - P_0}{0.5\rho u_h^2} \quad (1)$$

式中: $P_i(t)$ 为风洞试验中压力扫描阀测得的风压时程; P_0 为风洞试验段的静压; ρ 为空气密度, 取 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$; u_h 为屋盖最高点处的平均风速。 $C_{pi}(t)$ 的平均值 \bar{C}_{pi} 和根方差值 \tilde{C}_{pi} 分别称为平均风压系数和脉动风压系数。屋盖上表面的平均风压系数减下表面的平均风压系数称为净平均风压系数, 同理可得净脉动风压系数。文中所有风压系数均以屋盖最

谱, Davenport 谱) 基本一致。

2 平均风压系数和平均体型系数

测点 i 的风压系数 $C_{pi}(t)$ 定义为:

式中: N 为屋盖的测点总数; A_i 为测点 i 所代表的面积; A 为屋盖的总面积; h 为屋盖的最高点高度; \bar{h} 为屋盖的平均高度; α 为地面粗糙度指数, 对 B 类风场, $\alpha = 0.16$ 。屋盖上表面体型系数减下表面体型系数为净体型系数。

2.1 屋盖平均体型系数

图 5 给出了活动屋盖关闭和开启时固定屋盖上表面、下表面和净体型系数随风向角变化的规律。从图中可以看出, 活动屋盖开启和关闭两种工况下固定屋盖上表面体型系数变化趋势一致, 大小基本相等, 且均在 $-0.39 \sim -0.50$ 之间变化, 这说明活动屋盖关闭和开启对固定屋盖上表面的风荷载影响较小。当活动屋盖关闭时, 由于基本密封, 固定屋盖下表面体型系数为零; 但当活动屋盖开启时, 固定屋盖下表面出现了 $-0.40 \sim -0.55$ 的负体型系数 (图 5), 说明当活动屋盖开启时, 固定屋盖下表面受到了向下的平均风吸力。从图 5 可以看出, 由于活动屋盖开启使得固定屋盖下表面受到较大的向下风荷载, 导致活动屋盖开启时固定屋盖的净体型系数基本接近于零, 为 $-0.01 \sim 0.05$ 。活动屋盖关闭时, 固定屋盖的净体型系数在 $-0.39 \sim -0.50$ 之间。因此, 活动屋盖开启时固定屋盖上表面的平均风荷载远小于活动屋盖关闭时的平均风荷载。

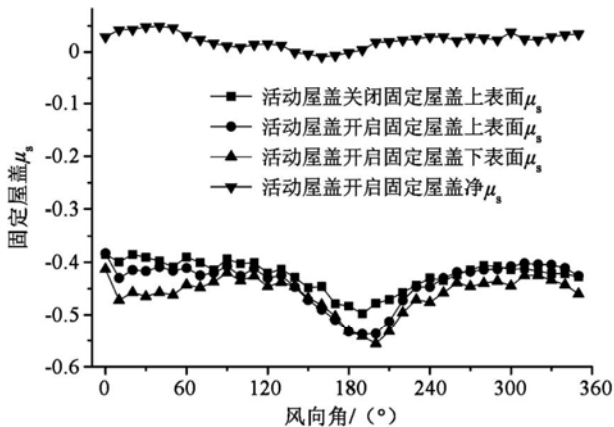


图 5 固定屋盖体型系数

Fig 5 Shape coefficient of fixed roof

图 6 给出了活动屋盖开启和关闭时活动屋盖上表面、下表面和净体型系数随风向角的变化规律。从图 6 可以看出, 活动屋盖关闭时活动屋盖上表面体型系数的大小在 $-0.58 \sim -0.71$ 范围内, 活动屋盖开启时其值在 $-0.37 \sim -0.62$ 范围内。在所有风向角下, 活动屋盖开启时活动屋盖上表面的体型系数均大于活动屋盖关闭时的值, 这主要是因为活动屋盖关闭和开启时活动屋盖所处的空间位置不同造成的。活动屋盖关闭时, 其下表面的体型系数也为零。当活动屋盖开启时, 活动屋盖与部分固定屋盖重合, 间距为 1.5m (模型间距为 5mm), 可以透风, 从而造成活动屋盖下表面较大的负体型系数 ($-0.27 \sim -0.49$), 表现为向下的风吸力。活动屋盖关闭和开启时其净体型系数分别在 $-0.58 \sim -0.71$ 和 $-0.07 \sim -0.21$ 范围内, 这说明活动屋盖关闭时活动屋盖向上的平均风荷载远大于活动屋盖开启时的值。

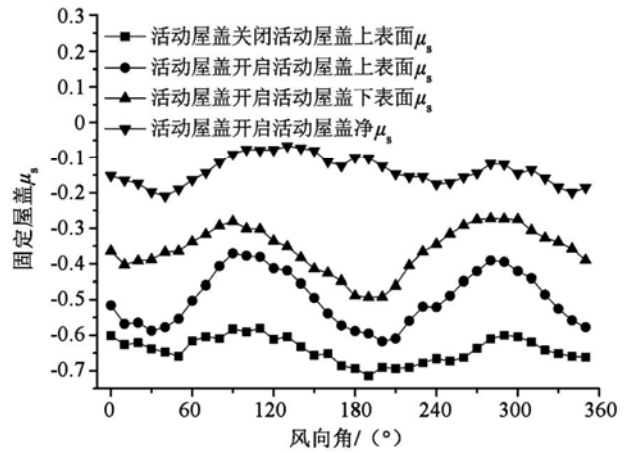


图 6 活动屋盖体型系数

Fig 6 Shape coefficient of retractable roof

2.2 屋盖平均风压系数

从图 5 和图 6 中可以看出, 屋盖最大平均风荷载出现在 180° 风向角附近, 为此本文仅研究 180° 风向角下屋盖平均风压系数和脉动风压系数分布规律。

图 7 给出了活动屋盖开启时 180° 风向角下固定屋盖上表面、下表面和净平均风压系数等值线图。由图 7a 可以看出, 活动屋盖开启时 180° 风向角下, 固定屋盖上表面迎风侧平均风压系数为 -0.6 左右, 在左右两侧出现 -0.9 平均风压系数, 说明此处气流分离较为强烈, 尾流区的平均风压系数在 $-0.3 \sim -0.8$ 之间。活动屋盖开启对固定屋盖下表面平均风压系数产生较大影响。从图 7b 可以看出, 活动屋盖开启时固定屋盖下表面平均风压系数在 $-0.42 \sim -0.48$ 范围内, 分布较为均匀, 最小值 -0.48 出现在屋顶口的气流分离处。正是由于下表面负平均风压系数, 与上表面的负平均风压系数相互抵消, 使得屋盖大部分区域的净平均风压系数接近于零, 如图 7c 所示。因此, 从平均风压系数分布的研究可以得到与 2.1 小节相同的结论: 活动屋盖的开启, 可有效减小固定屋盖上的平均风荷载。

图 8 给出了活动屋盖开启时 180° 风向角下活动屋盖上表面、下表面和净平均风压系数等值线图。由图 8a 可以看出, 活动屋盖开启时 180° 风向角下, 活动屋盖上表面平均风压系数在 $-0.20 \sim -0.80$ 范围内, 在左右两侧出现由 -0.20 变为 -0.80 的突变区域, 说明此处的气流分离较为强烈, 尾流区的平均风压系数在 $-0.5 \sim -0.8$ 之间。活动屋盖开启对活动屋盖下表面平均风压系数产生较大影响。从图 8b 可以看出, 活动屋盖开启时活动屋盖的下表面平均风压系数在 $-0.3 \sim -0.6$ 范围内。正是由于活动屋盖下表面的负平均风压系数, 与上表面的负平均风压系数相互抵消, 使得开启状态下活动屋盖大部分区域的净平均风压系数 ($0.2 \sim 0.4$) 较活动屋盖关闭状态小, 如图 8c 所示。

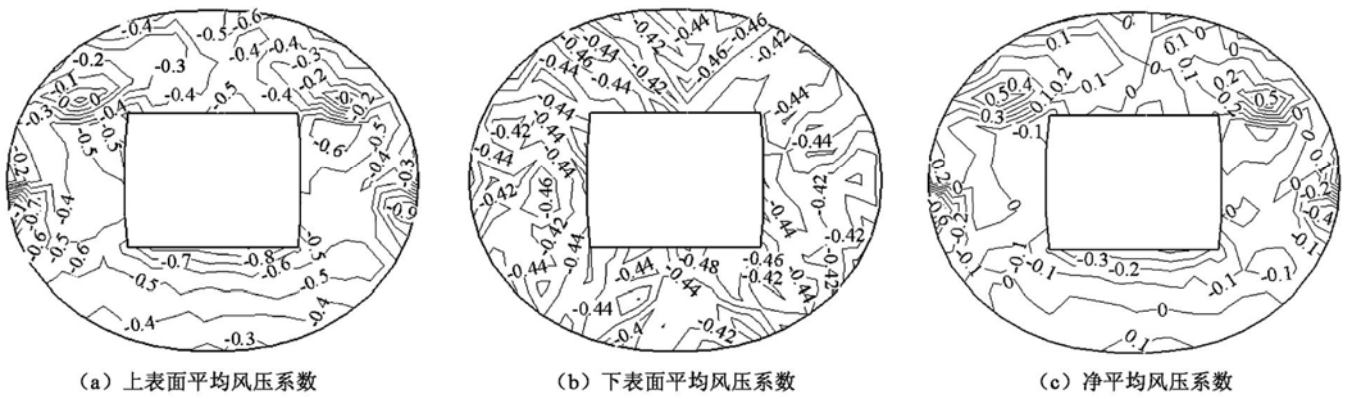


图 7 活动屋盖开启时固定屋盖的平均风压系数等值线

Fig 7 Mean wind pressure coefficients distribution of fixed roof for opened case

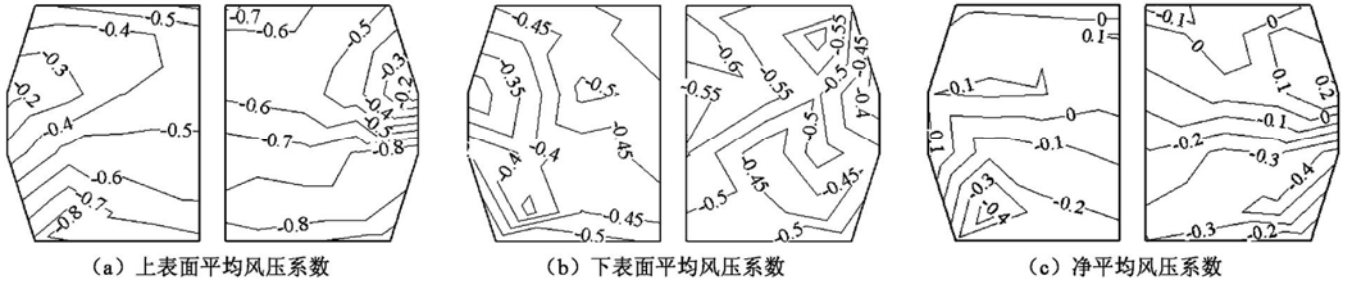


图 8 活动屋盖开启时活动屋盖的平均风压系数等值线

Fig 8 Mean wind pressure coefficients distribution of retractable roof for opened case

2.3 脉动风压系数

图 9 给出了活动屋盖关闭和开启时 180° 风向角下固定屋盖净脉动风压系数等值线图。由图 9a 可以看出, 活动屋盖关闭时 180° 风向角下固定屋盖净脉动风压系数在 $0.04 \sim 0.24$ 范围内, 最大值 0.24 出现在固定屋盖左侧。由图 9b 可以看出, 活动屋盖开启时 180° 风向角下固定屋盖净脉动风压系数在 $0.04 \sim 0.34$ 范围内分布, 最大值 0.34 出现在固定屋盖屋顶口处, 此处的来流分离最为强烈。从总体上看, 活动屋盖开启增大了固定屋盖的净脉动风荷载。

图 10 给出了活动屋盖关闭和开启时 180° 风向角下活动屋盖净脉动风压系数等值线图。由图 10a 可以看出, 活动屋盖关闭时 180° 风向角下活动屋盖净脉动风压系数在 $0.06 \sim 0.20$ 范围内, 最大值 0.20 出现在活动屋盖的迎风侧, 此处来流分离较为强烈, 在尾流区主要以 $0.06 \sim 0.08$ 范围分布。由图 10b 可以看出, 活动屋盖开启时 180° 风向角下活动屋盖净脉动风压系数在 $0.08 \sim 0.22$ 范围内分布, 且其值的变化梯度大, 最大值 0.22 出现在活动屋盖的迎风侧, 此处的来流分离较为强烈。从总体上看, 活动屋盖开启增大了活动屋盖的净脉动风荷载。

2.4 极值风压系数

测点 i 的极大值风压系数 $C_{pi \max}$ 和极小值风压系数 $C_{pi \min}$ 分别定义为:

$$C_{pi \max} = \bar{C}_{pi} + g\tilde{C}_{pi} \quad (3a)$$

$$C_{pi \min} = \bar{C}_{pi} - g\tilde{C}_{pi} \quad (3b)$$

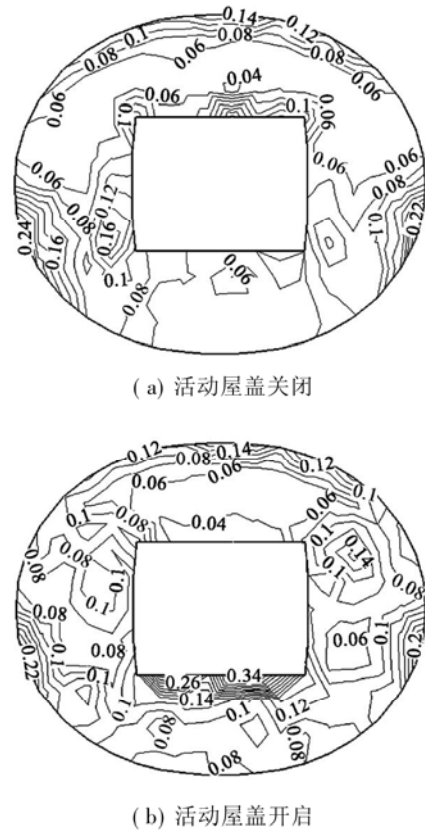
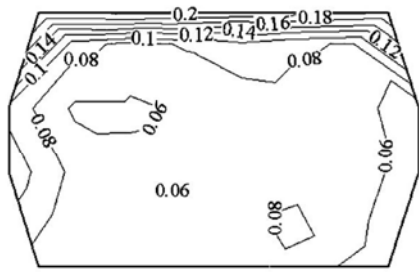


图 9 固定屋盖净脉动风压系数

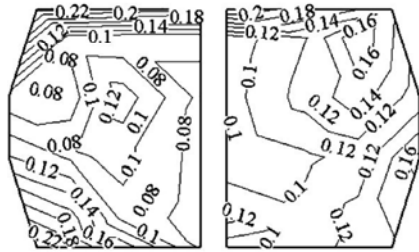
Fig 9 Net fluctuating pressure coefficients distribution of fixed roof

式中: g 为峰值因子, 取 $g = 3.5$ 。文中体育场屋盖风荷载以向上的吸力为主, 所以本文仅研究极小值风压系数。

图 11 给出了活动屋盖关闭和开启时 180° 风向



(a) 活动屋盖关闭

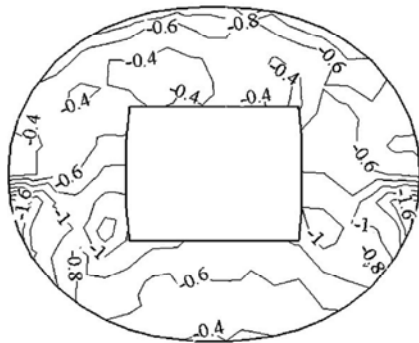


(b) 活动屋盖开启

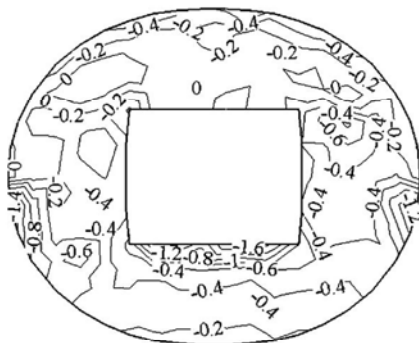
图 10 活动屋盖净脉动风压系数

Fig 10 Net fluctuating pressure coefficients distribution of retractable roof

角下固定屋盖极小值风压系数等值线图。由图 11a 可以看出,活动屋盖关闭时固定屋盖极小值风压系数在 $-0.4 \sim -1.6$ 范围内分布,在左右两侧出现 -1.6 的极小值风压系数,说明此处气流分离较为强烈,尾流区的平均风压系数在 $-0.4 \sim -0.8$ 之间。活动屋盖开启时,固定屋盖极小值风压系数在 $0 \sim$



(a) 活动屋盖关闭



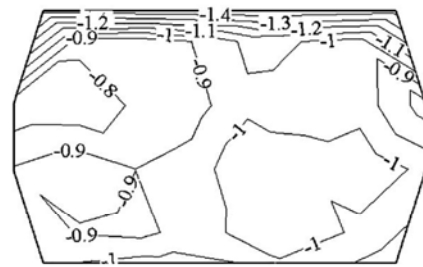
(b) 活动屋盖开启

图 11 固定屋盖极小值风压系数

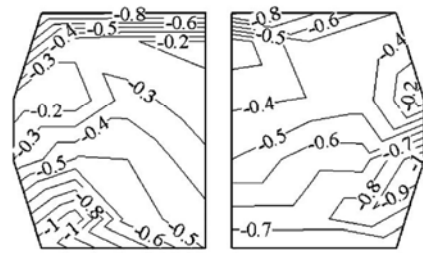
Fig 11 Extreme pressure coefficients distribution of fixed roof

-1.6 范围内分布 (图 11b), 风压系数 -1.6 分布在固定屋盖背风侧的屋顶口处, 此处的来流分离较为强烈, 从总体上看, 活动屋盖开启减小了固定屋盖的极小值风荷载。且固定屋盖背风侧的屋顶开口处会出现较大的极小值风荷载。

图 12 给出了活动屋盖关闭和开启时 180° 风向角下活动屋盖极小值风压系数等值线图。由图 12a 可以看出, 活动屋盖关闭时活动屋盖极小值风压系数在 $-0.80 \sim -1.40$ 范围内分布, 在活动屋盖的迎风前缘出现 -1.40 的极小值风压系数, 说明此处气流分离较为强烈, 尾流区的平均风压系数在 $-0.80 \sim -1.0$ 之间较均匀的分布。活动屋盖开启时, 活动屋盖极小值风压系数在 $-0.2 \sim -1.0$ 范围内分布 (图 12b), 分布较为均匀。从总体上看, 活动屋盖开启减小了活动屋盖的极小值风荷载。



(a) 活动屋盖关闭



(b) 活动屋盖开启

图 12 活动屋盖极小值风压系数

Fig 12 Extreme pressure coefficients distribution of retractable roof

3 结论

通过对一个活动屋盖可开启的开合式屋盖体育场进行刚性模型风洞测压试验, 研究了活动屋盖开启对固定屋盖和活动屋盖的总体风压系数、典型风向角的平均风压系数、极小值风压系数的影响, 得出以下结论:

- (1) 活动屋盖开启可有效减小固定屋盖和活动屋盖的净平均风荷载, 引发整个结构向下的风荷载;
- (2) 活动屋盖开启将增大固定屋盖和活动屋盖的净脉动风荷载;
- (3) 活动屋盖开启将减小固定屋盖和活动屋盖

的极小值风荷载,且固定屋盖上的最大极小值风压系数点的位置往屋顶开口方向移动。

参 考 文 献

- [1] Holmes J D. Mean and fluctuating internal pressures induced by wind [C] // Proceeding of the 5th International Conference on Wind Engineering Fort Collins, Colorado, USA: Pergamon Press, 1979. 435-450
- [2] Liu Henry, Saathoff P J. Building internal pressure Sudden change [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1981, 107(2): 309-321.
- [3] Vickery B J, Bloxham C. Internal pressure dynamics with a dominant opening [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1992, 41-44 193-204
- [4] Woods A R, Blackmore P A. The effect of dominant openings and porosity on internal pressures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1995, 57: 167-177.
- [5] Shama R N, Richards P J. Computational modeling of the transient response of building internal pressure to a sudden opening[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1997, 72 149-161.
- [6] Pearce W, Sykes D M. Wind tunnel measurements of cavity pressure dynamics in a low-rise flexible roofed building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1999, 82 27-48
- [7] Ginger J D, Letchford C W. Net pressures on a low-rise full-scale building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1999, 83 239-250
- [8] 卢旦,楼文娟,孙炳南,唐锦春.突然开孔结构的风致内压及屋盖响应研究 [J]. 振动工程学报, 2005, 18 (3): 299-303 (Lu Dan, Lou Wenjuan, Sun Bingnan, Tang Jinchun. Wind-induced internal pressure and roof response of sudden opening building [J]. Journal of Vibration Engineering 2005, 18 (3): 299-303 (in Chinese))
- [9] 余世策,楼文娟,孙炳南,顾正维,卢旦.开孔结构内部风效应的风洞试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28 (4): 76-82 (YU Shice, LOU Wenjuan, SUN Bingnan, GU Zhengwei, LU Dan. Wind tunnel study on internal wind effect for structure with openings [J]. Journal of Building Structures 2007, 28(4): 76-82 (in Chinese))
- [10] 余世策,楼文娟,孙炳南.大跨屋盖结构风洞试验模型的设计方法讨论 [J]. 建筑结构学报, 2005, 26 (4): 92-98 (YU Shice, LOU Wenjuan, SUN Bingnan. Discussion of design method for wind tunnel test model of long-span roof structures [J]. Journal of Building Structures 2005, 26(4): 92-98 (in Chinese))
- [11] 黄鹏,顾明.一大跨度悬挑雨篷的风荷载及开洞比较 [J]. 结构工程师, 2004, 20(4): 51-55 (Huang Peng, Gu Ming. Experimental study and comparison analysis on wind load of large span cantilever roof [J]. Structural Engineers 2004, 20 (4): 51-55 (in Chinese))