

大跨度悬挑屋盖风驱雨压分布特性的数值模拟研究

孙芳锦¹, 吕艳卓¹, 冯 旭²

(1. 辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 五冶集团上海有限公司, 上海 201900)

摘要: 目前大跨度悬挑屋盖设计通常忽略结构的风驱雨压, 而风驱雨压是造成该类结构破坏的重要原因之一, 为此研究大跨度悬挑结构表面风驱雨压的分布规律. 为克服欧拉-拉格朗日多相流模型只能得到物理层面相对值的缺点, 采用欧拉-欧拉多相流模型, 研究风速、雨强变化条件下, 悬挑屋盖表面风驱雨平均压力分布规律, 并与单独风荷载作用时的风压分布进行了对比; 计算了风驱雨条件下屋盖上下表面的极限体型系数. 总结分析了大跨度悬挑屋盖表面风驱雨压分布特征和规律. 研究表明: 悬挑屋盖的风驱雨压较单独风作用时增幅明显, 压力增大 1.1-2.18 倍; 极限暴雨雨强工况下较中度暴雨工况下压力增大 1.07-1.24 倍. 因此建议在进行大跨度悬挑屋盖设计时应考虑风驱雨效应, 适当增大安全指数.

关键词: 大跨度挑檐屋盖; 风驱雨; 欧拉-欧拉多相流模型; 压力分布特性

中图分类号: TU973

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)04-0470-08

Study on wind-driven rain pressure distribution characteristics of large span cantilever roof

SUN Fangji¹, LÜ Yanzhuo¹, FENG Xu²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

2. Mcc5 Group Shanghai Co. Ltd, Shanghai 201900, China)

Abstract: Currently long-span cantilever roof design usually ignores wind-driven rain pressure distribution characteristics of structure, which is one of the most important causes for the destruction of this type of structure. Pressure distribution on the surface of long-span cantilever structure under co-action of wind and rain is studied. Euler-Euler multiphase flow model is employed to overcome the disadvantage of only getting physical relative value by Euler-Lagrange of multiphase flow model. The average wind-driven rain pressure on the top surface of cantilever roof with different wind speed and wind rainfall intensity is studied, and is compared with wind pressure coefficients under wind loading. Limit coefficients on the top and bottom surface of roof under co-action of wind and rain are calculated. Wind-driven rain pressure distribution characteristics on the surface of long-span cantilever structure are summarized. The results show that the pressure of cantilever roof increase under combined loads of wind and rain increases 1.1 to 2.18 times compared with that under sole wind loading. The pressure increases 1.07 to 1.24 times at limit rain storm compared with that of medium rain storm. Safety index is suggested to increase appropriately in the wind-driven rain design of long-span cantilever roof.

Key words: long-span cantilever roof; wind-driven rain; Euler- Euler of multiphase flow model; pressure distribution characteristics

大跨度挑檐屋盖因其造型美观、实用性强而常被应用于实际体育场馆工程中, 悬挑屋盖常常会遭受风雨作用. 但目前的大跨度挑檐屋盖设计基本只考虑单独竖向雨荷载的作用, 对建筑迎风面表面风驱雨压特性的研究却非常少. 然而我国是世界上热带气旋登陆最多的国家之一, 历次台风灾害后低层房屋损坏灾后调查表明^[1-3], 多数情况下

台风登陆时, 通常是台风携带暴雨共同作用在结构上, 形成风驱雨作用, 风驱雨是雨在降落过程中因受风力影响而形成斜雨的一种自然现象, 大量风驱雨滴以较大速度撞击建筑壁面, 易加剧结构或构件破坏. 因此研究大跨挑檐度屋盖表面风驱雨压分布特性, 对于提高建筑的是适度, 并降低其灾害破坏是非常有意义的工作.

收稿日期: 2016-10-09

修改稿日期: 2017-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(51108345); 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室开放课题; 同济大学土木工程防灾国家重点实验室开放基金(SLDRCE-MB-04); 辽宁省教育厅基金一般项目(LJYL030); 大学生创新训练项目(201610147000066)

第一作者: 孙芳锦(1981—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事结构防灾减灾与抗风等方面研究. E-mail: e_dm@163.com

目前国内外对建筑风驱雨的研究主要集中在建筑迎风面风驱雨量、表面温度和墙面湿度等物理层面^[4-5], 而对风驱雨造成的建筑结构表面的压力分布特性的研究却极为有限。目前国内外数值模拟研究风驱雨的方法主要有欧拉-拉格朗日(Euler-Lagrange frame)和欧拉-欧拉(Euler-Euler frame)两种多相流模型。欧拉-拉格朗日模型最初由 Chio^[6-8]提出并应用于三维稳态风场下的雨滴轨迹计算, 后来许多学者又在此基础上提出了各自的欧拉-拉格朗日模型^[9-11]。它将符合自然降雨规律的风雨相看做是不连续的离散相, 将每一个不同直径雨滴处理成在流域空间中不连续的点, 在流域顶端布置插入范围后定义所有不同雨滴直径、末速度等进行数值模拟。欧拉-拉格朗日多相流模型的缺点是明显的: 只能得到物理层面相对值, 无法得到类似与连续相风场中低矮建筑各种场图(速度场、压力场等)。欧拉-拉格朗日方法一度成为风驱雨研究的主要方法; 欧拉-欧拉方法的风驱雨研究开展的较晚, 直到 21 世纪初期才被国外学者所认可, 最早由 Huang 和 Li^[12]它将符合自然降雨规律降雨模型雨相看做是连续的, 适用于类似与连续风相的质量、动量和能量守恒方程, 且不同于欧拉-拉格朗日方法在研究风雨联合作用时需要先得到一个稳定风场后才定义雨相, 可在定义风相边界时通过不同雨相速度和雨相体积分数定义雨相边界条件, 这样大大减少了计算量和工作量, 且可以得到风雨联合场中低矮建筑各种场图, 因此更适合研究外型复杂的建筑结构的风驱雨作用。

国内外大部分研究都采用欧拉-拉格朗日多相流模型: 1991 年 Choi^[6-8]首次在三维风场中插入雨场计算得到雨滴迹线图, 并且得到了三维风场中建筑物迎风面 WDR 的分布情况; 2000 年 Bloken 和 Carliet^[9]对 Choi 的数值模拟做了进一步的补充, 在加入了时间因素后得到了 WDR 在三维风场中的空间分布情况。2002 年 Sankaran^[13]首次利用 CFD 计算软件模拟得出三维风场中建筑物迎风面表面分压的分布情况, 但只考虑了在建筑物上游和顶面布置不同粒径的雨滴的影响。国内学者吴小平^[14]利用 CFD 计算软件分别讨论了在二维风场和三维风场中低矮建筑迎风面风雨荷载效应与不同风速、不同风向角、不同降雨强度以及不同屋面坡度等影响因素下的大致分布规律与总体变化趋势, 并研究得到了低矮建筑建筑群的风驱雨量分布规律。张丽^[15]通过对福建土夯楼迎风面风驱雨撞击荷载进行理论分析, 得出真实情况下不能忽

略雨滴附加荷载对建筑物迎风面的撞击作用。郑永鑫^[16]利用 CFD 数值模拟方法对二维风雨场中建筑迎风面风雨荷载进行了模拟研究, 研究发现风雨联合作用是雨滴附加荷载最大能达到纯风荷载的 35%。在欧拉-欧拉(Euler-Euler)多相流方法方面的研究则相对较少, 国外学者 Kubilay^[17]等利用 Euler-Euler 方法研究了低矮方形建筑列阵的风驱雨量, 模拟准确得到了两次降雨过程共 18 个测点的风驱雨强度。国内学者王辉^[18]对单体多、高层建筑及特定群体建筑 WDR 场进行模拟, 揭示了单体与群体建筑 WDR 雨压荷载的作用程度。韩涵^[19]利用研究得出三维风雨场中建筑(群)立面风驱雨分布特性, 并证明了排列间距是低矮房屋建筑(群)迎风面风驱雨分布规律的主要影响因素。

本文采用 Euler-Euler 方法研究悬挑大跨度屋盖表面的风驱雨压分布特性。计算得到风速、雨强变化条件下的屋盖上下表面平均压力系数大小和分布规律, 并与单独风荷载作用的风压分布进行了对比; 计算了单独风作用时和屋盖上下表面风驱雨的极限体型系数, 总结分析了大跨度悬挑屋盖表面的风驱雨压分布特征和规律, 为更准确的进行该类结构设计提供有益参考。

1 欧拉-欧拉多相流模型的控制方程

在欧拉-欧拉多相流模型中, 风相和雨相均看成是连续体。雨相的边界条件是沿着入口边界施加的, 因此该方法更容易进行瞬时模拟。

1.1 空气相控制方程

空气相方程由 $N-S$ 方程控制, 这里采用标准 $k-\epsilon$ 模型模拟湍流, 则空气相控制方程为

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_a u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho_a \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{K} G_K - C_{2\epsilon} \rho_a \frac{\epsilon^2}{K} \quad (4)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho_a \frac{K^2}{\epsilon} \quad (5)$$

式中: ρ_a 表示空气的密度; p 指压力; τ_{ij} 指的是雷诺兹应力; k 代表湍流动能; ϵ 代表湍流耗散率; μ 代表空气动力层流; μ_t 代表空气动力湍流粘度;

σ_k 代表湍流动能的湍流普朗特数; σ_e 是湍流耗散率的湍流普朗特数; G_k 是由于平均速度梯度引起的湍流动能; C_μ 、 $C_{1\epsilon}$ 和 $C_{2\epsilon}$ 是常数. 在本研究中使用了以下模型常量: $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_e = 1.3$. 在 $k-\epsilon$ 模型中, 雷诺应力使用湍流粘度 μ_t 建模, 这里将 μ_t 假定为各向异性.

1.2 雨相控制方程

由于大小相近的雨滴会以组群的形式与风相互作用, 因此每组大小不同的雨滴看成是不同的相, 对其列质量和动量守恒方程, 形成雨相的控制方程.

$$\frac{\partial \rho_w \alpha_k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_w \alpha_k u_{kj})}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_w \alpha_k u_{ki}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_w \alpha_k u_{ki} u_{kj})}{\partial x_j} = \rho_w \alpha_k g + \rho_w \alpha_k \frac{3\mu}{\rho_w d^2} - \frac{C_d Re_R}{4} (u_i - u_{ki}) \quad (7)$$

式中: d 代表雨滴直径; α_k 雨的第 k 个体积分数; u_{ki} 是雨的第 k 个速度分量; u_i 是风的速度分量; ρ_w 是雨滴的密度; g 是重力加速度; C_d 是阻力系数; Re_R 表示相对雷诺数, 并采用如下公式进行计算:

$$Re_R = \frac{\rho_a d}{\mu} |u - u_k| \quad (8)$$

其中: u 是风速; u_k 是雨速.

由于本文利用欧拉-欧拉方程多相流方法研究大跨度屋盖风驱雨压分布, 故类似于连续性介质风场中可以得到来流风影响下建筑物表面各种场图, 在拟连续介质雨场中雨滴不再被处理成离散相, 便可以得到各种场图. 鉴于此, 定义雨荷载计算公式如下:

$$p_{rain} = \int_0^\infty \rho_l a_D(D) |V_n(D)|^2 dD \quad (9)$$

式中: $V_n(D)$ 为雨滴撞击大跨度悬挑屋盖结构时法向速度大小; ρ_l 为液态水密度.

1.3 边界条件

1.3.1 风相边界条件

流体入口处风速选用对数率风速剖面:

$$U = U_* \times \ln[(z + z_l)/z_l]/K \quad (10)$$

式中: U_* 为摩擦速度, 取 $U_* = 0.705 \text{ m/s}$; z_l 为粗糙长度, 取 $z_l = 2.4 \times 10^{-3} \text{ m}$; K 为冯·卡门系数, 取 $K = 0.42$; z 、 U 为建筑平均高度及相应高度处平均风速.

1.3.2 雨相边界条件

和连续性介质风场数值模拟设置类似, 拟连续介质雨场中同样需要设置雨相边界条件. 在欧拉-欧拉方程中, 由于针对不用雨滴直径大小,

为此引入了相体积分分数 (Phase volume fraction) 概念, 该概念为空间和时间的连续性函数, 在数值上各相体积分数之和为 1. 本文参照文献[12]的做法, 引进了不同直径雨相体积分数概念: 雨相体积分数 a_k :

$$a_k = \frac{R_h f_h(D, R_h)}{v_t(D)} \frac{1 \times 10^{-3}}{3600} \quad (11)$$

其中: R_h 为一次降雨过程中水平降雨强度, $f_h(D, R_h)$ 为雨滴直径为 D 的雨滴流量分数:

$$f_h(D, R_h) = \frac{D^3 N(D, R_h) v_t(D)}{\int_0^\infty D^3 N(D, R_h) v_t(D) dD} \quad (12)$$

其中: $\alpha = 2.93$, 而 $N(D, R_h)$ 为单位体积尺寸差为 dD 范围内雨滴数量, $N(D, R_h) = N_0 D^\alpha \exp(-\Lambda D)$, $N_0 = 1.98 \times 10^7 R^{-0.384}$, $\Lambda(R) = 5.38 R^{-0.186}$, 都为雨强 R 的函数, $v_t(D)$ 为直径为 D 的雨滴重力方向末速度 (雨滴末速度), 按照如下公式进行计算取值[8]:

$$V_m = 10^6 \left(\frac{0.787}{D^2} + \frac{503}{\sqrt{D}} \right)^{-1}, 0 < D < 1.0 \text{ mm} \quad (13)$$

$$V_m = (17.2 - 0.844D) \sqrt{0.1D}, 1.0 \text{ mm} < D < 3.0 \text{ mm} \quad (14)$$

$$V_m = \frac{D}{0.113 + 0.0845D}, 3.0 \text{ mm} < D < 6.0 \text{ mm} \quad (15)$$

由上述公式可以看出, 雨滴末速度公式的取值是分别按照 $0 < D < 1.0 \text{ mm}$ 、 $1.0 \text{ mm} < D < 3.0 \text{ mm}$ 、 $3.0 \text{ mm} < D < 6.0 \text{ mm}$ 三个范围取值.

定义完雨滴相体积分数后, 完成了雨相入口边界条件第一项, 每一雨相体积分数是不同的. 接下来要进行第二项边界条件的设置, 即雨相在流场入口处雨滴速度大小, 这里雨滴水平速度取为水平风速大小, 两相之间无相对滑移速度, 重力方向速度按上公式(13)、(14)、(15)取值, 其余边界条件与风场中边界条件设置相同.

2 大跨度悬挑屋盖的风驱雨压分布

2.1 计算模型

本文所选大跨度悬挑屋盖结构为我国某市一中学体育场悬挑屋盖, 为典型前缘直线的矩形独立看台挑蓬屋盖结构, 其基本建筑工况见下 1-1 剖面图, 悬挑屋盖前缘厚度为 0.45 m , 后缘厚度为 1.2 m , 悬挑屋盖投影长度为 10.8 m , 悬挑屋盖倾角为 α , 看台倾角为 β , 看台通风率为 30% , 屋盖倾角为 $\alpha = 10^\circ$, 基座宽度为 9.3 m , 长度为 36 m ,

具体细部构造见图1. 本文利用 FLUENT 计算平台进行程序二次开发, 得到悬挑屋盖表面风驱雨压分布, 核心区域网格划分见图2.

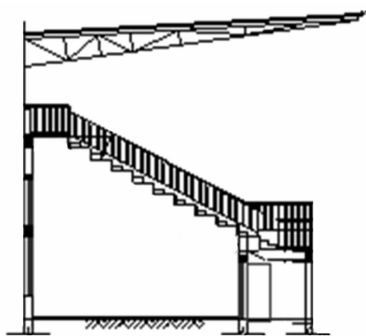


图1 悬挑屋盖结构剖面示意图

Fig.1 The cantilever roof section

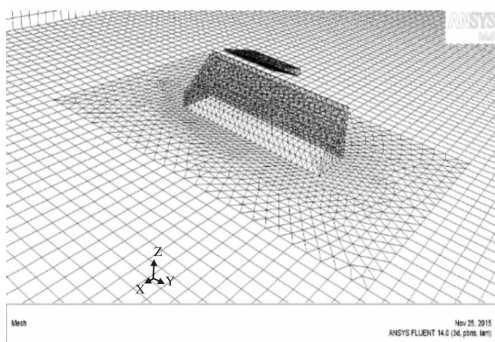


图2 悬挑屋盖核心区域网格划分

Fig.2 Meshing of cantilever roof

现阶段国内外只有澳大利亚荷载规范(S1170.2-1989)对典型前缘直线的矩形独立看台挑蓬屋盖结构定义了风荷载分布特性, 认为应该采用三角形来表示典型前缘直线的矩形独立看台挑蓬屋盖结构表面风荷载, 且规定悬挑屋盖悬挑长度大于5 m 时其横风向动力风荷载计算公式为

$$P_C = C_{PC} \bar{q}_h \quad (16)$$

式中: P_C 为悬挑屋盖前缘最大设计风压; \bar{q}_h 为屋盖高度为 h 处平均风压力; C_{PC} 为悬挑屋盖迎风边缘处峰值压力系数.

为更好研究其上下表面荷载分布规律, 数值模拟时将悬挑屋盖分成12个均等条形带区域, 每个区域纵向长度为 $\frac{1}{12}L$ (L 为屋盖纵向长度), 为方便取值, 在每一个条形带区域上下表面都布置6个典型测点, 合计144个典型测点, 每条条形带纵向典型测点1、2和5、6间距均设置为0.45 m, 测点2、3、4、5间距设置为3 m, 测点具体位置及间距如图3所示.

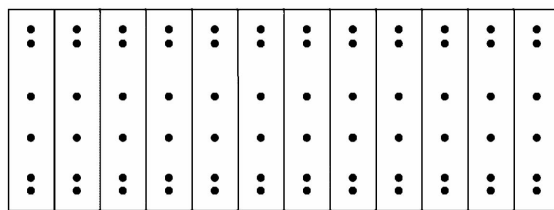


图3 悬挑屋盖条形带典型测点布置简图

Fig.3 The brief of typical station on cantilever roof

为体现出典型前缘直线大跨度悬挑屋盖结构在风单独作用和风驱雨荷载特性分布规律, 这里极限整体体型系数^[14], 其计算公式如下:

$$F = \sum_{i=1}^n (C_{pi} W_r \cos \alpha_i L_i) \quad (17)$$

$$\mu_s = \frac{F}{\mu_z w_0 L} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{pi} W_r \cos \alpha_i L_i) \mu_{zr}}{\mu_z L} = \frac{F}{0.5 \rho V_\infty^2 A} \quad (18)$$

式中: F 为悬挑屋盖上下表面极限平均压力系数, 约定上表面时为极限正平均压力系数, 下表面时为极限负平均压力系数, 否则反之; μ_s 为屋盖上下表面整体体型系数; L_i 为屋盖迎风面参考长度; μ_{zr} 为典型测点高度处风压高度系数; μ_z 为典型测点高度变化系数; A 为悬挑屋盖面积; C_{pi} 为典型测点 i 处平均风压系数.

2.2 结构风雨联合作用下大跨度悬挑屋盖表面压力分布模拟

这里研究风向角为0、雨强为 $I = 200$ mm/h 时, 不同基准风速 $U_{10} = 10$ m/s 和 $U_{10} = 30$ m/s 时大跨度屋盖悬挑结构风驱雨压分布. 模拟计算得到了大跨度悬挑屋盖纵向中轴线处风速矢量图和屋盖表面平均风压系数, 并模拟了风荷载单独作用时屋盖的风压系数, 以进行对比. 计算云图如图4所示, 受篇幅所限, 这里只给出了 $U_{10} = 10$ m/s 和 $U_{10} = 30$ m/s 的情况.

分析图4, 可以得到如下结论:

(1) 单独风荷载作用时, 不同风速下大跨度悬挑屋盖上表面平均风压系数变化不明显, 当基准风速为 $U_{10} = 10$ m/s 时大跨度悬挑屋盖前缘最大平均压力系数在 $0.8 \sim 1.0$ 范围内变化, 变化幅度不大; 大跨度悬挑屋盖下表面最大平均压力系数在 $-0.8 \sim -1.0$ 范围内变化, 最大增幅1.11倍, 变化趋势同样不是很明显. 基准风速为 $U_{10} = 30$ m/s 较基准风速为 $U_{10} = 10$ m/s 时悬挑屋盖上表面后缘边缘平均压力系数分布规律也大致相同, 且上下表面正平均风压系数沿悬挑屋盖横向中轴线对称分布较为明显.

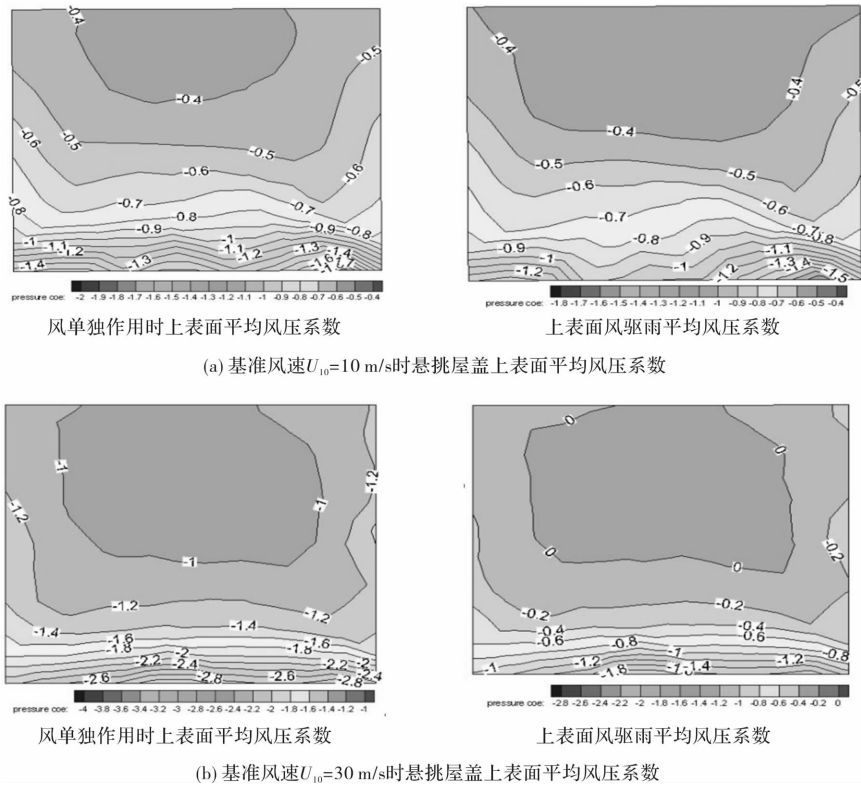


图 4 不同基准风速下悬挑屋盖上下表面平均风(雨)压系数云图

Fig. 4 The clouds of average wind pressure coefficient at different wind speed

(2)与风荷载单独作用相比,大跨度悬挑屋盖上表面风驱雨平均压力系数增幅明显,基准风速为 $U_{10}=10$ m/s 时风雨联合作用下屋盖前缘来流分离处极限平均压力系数为纯风作用时 2.23 倍;但随着风速的增大,大跨度悬挑屋盖前缘来流分离处极限平均压力系数增幅呈现负增长情况,基准风速为 $U_{10}=10$ m/s 时较基准风速 $U_{10}=30$ m/s 时增大 1.51 倍,跌幅明显,这是因为在设置欧拉-欧拉多相流雨相时雨相直径按照 BEST 雨滴谱布置,大部分雨相直径集中在 $0.5\sim 2$ mm 范围间,大直径雨相体积分数较小,随着风速增大,大部分雨滴直接越过大跨度悬挑屋盖结构,而不与其发生

碰撞,也就不与其发生动量交换等过程,故随着风速增大悬挑屋盖上表面平均风驱雨压反而呈现负增长趋势.由于风相和不同直径雨相共用一个稳定收敛流场,类似于单独风作用时,屋盖上下表面风驱雨平均压力系数皆呈现较为明显的对称规律.

为更好体现大跨度悬挑屋盖结构上下表面平均风驱雨压力系数变化规律,本文计算了悬挑屋盖结构上表面条形带 1、条形带 7 上各典型测点处基准风速为 $U_{10}=20$ m/s 时,风单独作用和风驱雨平均压力系数,如表 1 所示.为更好表现变化趋势,利用后处理软件将其处理成折线图,如图 5 所示.

表 1 风单独作用和风驱雨作用大跨度悬挑屋盖上表面典型测点平均压力系数

Tab. 1 The typical average pressure coefficient measurement points on the large span cantilever roof under wind alone and wind-driven rain

	条形带 1		条形带 7		条形带 12	
	风单独作用	风驱雨作用	风单独作用	风驱雨作用	风单独作用	风驱雨作用
测点 1	-0.391	-0.710	-0.386	-0.512	-0.401	-0.717
测点 2	-0.423	-0.723	-0.417	-0.533	-0.431	-0.730
测点 3	-0.490	-0.756	-0.483	-0.567	-0.501	-0.750
测点 4	-0.612	-0.793	-0.601	-0.736	-0.587	-0.788
测点 5	-0.872	-1.212	-0.903	-1.612	-1.01	-1.198
测点 6	-1.112	-1.567	-1.107	-2.110	-1.212	-1.611

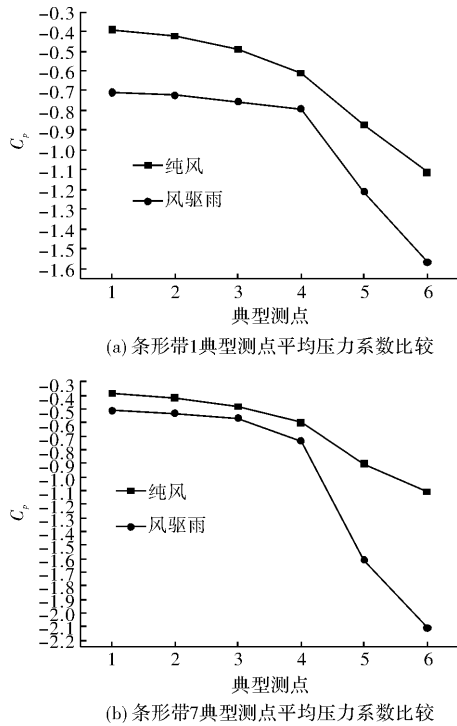


图5 基准风速为 $U_{10} = 20 \text{ m/s}$ 时屋盖典型测点平均压力系数比较

Fig. 5 The typical average pressure coefficient measurement points at $U_{10} = 20 \text{ m/s}$

分析图5可知,悬挑屋盖结构上表面典型测点处风驱雨平均压力系数均要比风单独作用时要大,且典型测点处平均压力系数增幅均较大,为分析整个大跨度悬挑屋盖上表面平均压力系数大小及变化规律,下文中将对极限平均压力系数进行分析。

由公式(17)、(18)可计算得到单独风作用时和风雨联合作用时大跨度悬挑屋盖上下表面极限体型系数,见图6。

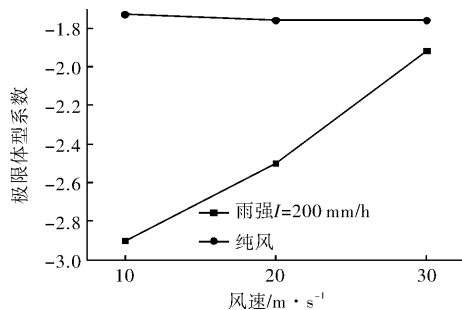


图6 不同风速屋盖上下表面极限体型系数

Fig. 6 The limit mean shape coefficient at different wind speed

由表1和图6可看出,与单独风荷载作用相比,大跨度悬挑屋盖上下表面风驱雨极限体型系数明显增大。基准风速 $U_{10} = 10 \text{ m/s}$ 大跨度悬挑屋盖上表面其极限体型系数较单独风作用时增大

2.18倍,基准风速故 $U_{10} = 30 \text{ m/s}$ 时大跨度悬挑屋盖上表面极限体型系数较单独风作用时增大1.10倍,增幅明显,故建议在进行大跨度悬挑屋盖设计时应适当考虑风雨联合作用因素,适当增大安全指数。

为进一步分析悬挑屋盖的风驱雨压分布规律,这里基准风速取 $U_{10} = 10 \text{ m/s}$,将三种暴雨雨强下工况的大跨度悬挑屋盖结构上表面条形带1、条形带7和条形带12上典型测点为研究对象,计算了其平均压力系数,并绘制折线图如图7所示。

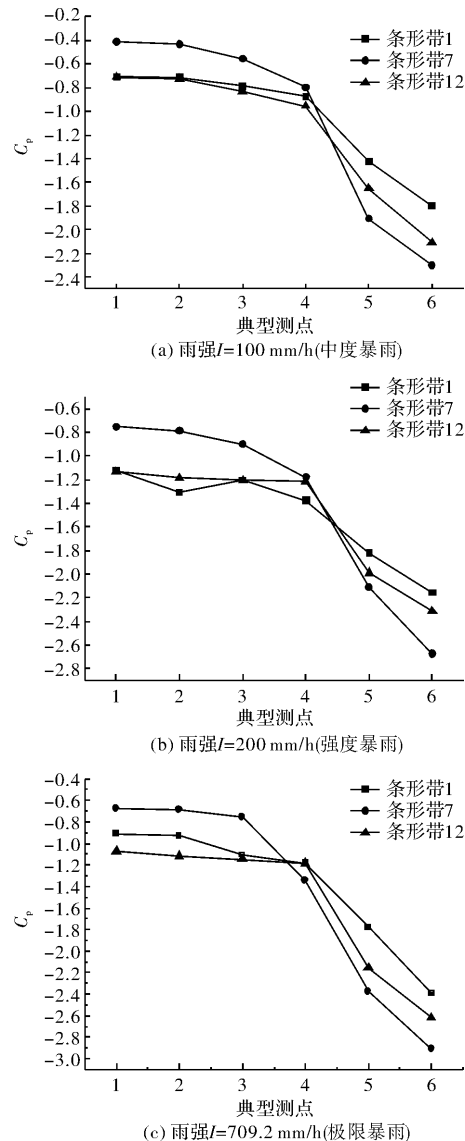


图7 不同雨强时大跨度悬挑屋盖结构模型测点平均压力系数

Fig. 7 The typical average pressure coefficient of measurement points under different rain intensity

分析图7可知:

(1)大跨度悬挑屋盖上表面两侧条形带典型测点1、2、3处风驱雨平均压力系数均要比处于中间位置条形带相应位置典型测点处大,这与来流风

在大跨度悬挑屋盖两侧边缘来流分离时湍流活动更加复杂相对应.而当越过典型测点4后,大跨度悬挑屋盖结构上表面处于中间位置条形带典型测点平均压力系数较屋盖两侧相应位置处典型测点平均压力稍大,荷载分布规律类似与风单独作用时,说明在风雨联合作用过程中大跨度悬挑屋盖结构典型测点4处存在突然平均压力系数增大区域,在实际设计施工过程中应着重验算风雨联合荷载情况,此处为一处最不利抗风雨位置.

(2)大跨度悬挑屋盖结构各个条形带前缘处典型测点平均压力最大,而按照来流风方向逐渐减少,屋盖后缘来流风尾流处各个条形上典型测点最小,说明一次自然降雨过程中大跨度悬挑屋盖结构前缘来流分离处为另一处最不利抗风雨位置,以屋盖中间区域位置为甚,需着重考虑加强防护措施.

为研究风雨联合作用时大跨度悬挑屋盖结构上下表面极限的最不利受力情况,按照公式(17)、(18)计算了悬挑屋盖上表面各个条形带上极限体型系数后取每种雨强工况下最不利极限体型系数绘制成折线图如下:

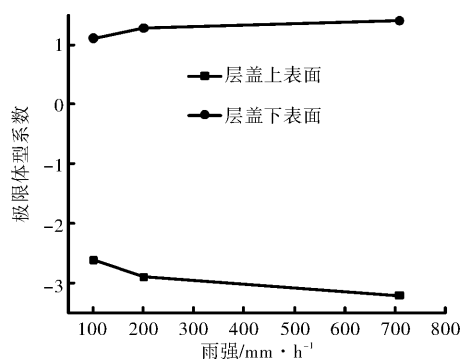


图8 不同雨强下大跨度悬挑屋盖上下表面极限体型系数分布
Fig. 8 The mean shape coefficient of top and bottom surface under different rain intensity

分析图8可知,随着雨强增大,大跨度悬挑屋盖结构上表面风驱雨极限体型系数也随之增大,极限暴雨雨强工况下较中度暴雨工况下,上表面压力增幅为1.24倍,下表面增幅为1.07倍,增幅较为明显,故在风雨联合作用中雨强对大跨度悬挑结构表面压力影响应予以足够重视.

3 结论

(1)随着风速增大,风雨联合作用下大跨度悬挑屋盖结构上表面平均压力系数随之增大,但随风速增大,大跨度悬挑屋盖结构上表面条形带典型测点上平均压力系数增大幅度有一定降低,这

是因为随着风速增大,不同直径雨相会直接越过悬挑屋盖表面,而不与发生碰撞.

(2)与单独风荷载作用相比,大跨度悬挑屋盖上下表面风驱雨极限体型系数明显增大.基准风速 $U_{10}=10$ m/s大跨度悬挑屋盖上表面其极限体型系数较单独风作用时增大2.18倍,基准风速 $U_{10}=30$ m/s时大跨度悬挑屋盖上表面极限体型系数较单独风作用时增大1.10倍,增幅明显.故建议在进行大跨度悬挑屋盖设计时应适当考虑风雨联合作用因素,适当增大安全指数.

(3)极限暴雨雨强工况下较中度暴雨工况下,屋盖上表面压力增大1.24倍,下表面增幅为1.07倍,增幅较为明显,故在建筑风驱雨研究中应重视雨强的影响,加强防范.

参考文献 References

- [1] 葛学礼. 浙江苍南县“桑美”台风建筑灾害与抗风技术措施[J]. 工程质量, 2006, 46(2): 18-22.
GE Xueli. Building disaster caused by Saomaityphoon in Cangnan County, Zhejiang Province as well as the technical measure for anti-typhoon[J]. Quality of Civil Engineering and Construction, 2006, 46(2): 18-22.
- [2] 付国宏. 低层房屋风荷载特性及抗台风设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
FU Guohong. On the wind load characteristics and wind resistant design of low-rise buildings[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [3] BLOCKEN B, CARMELIET J. A review of wind-driven rain research in building science [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(13): 1079-1130.
- [4] KUBILAY A, DEROMED, BLOCKEN B. Wind-driven rain on two parallel wide buildings: Field measurements and CFD simulations [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 146(9): 11-28.
- [5] CHOI E C C. Simulation of wind-driven rain around a building[J]. J Wind Eng Ind Aerod 1993; 46-7: 721-729.
- [6] CHOI E C C. Parameters affecting the intensity of wind-driven rain on the front face of a building[J]. J Wind Eng Ind Aerod 1994, 53(1/2): 1-17.
- [7] CHOI E C C. Numerical modeling of gust effect on wind-driven rain [J]. Wind Eng. Indus. Aerodyn, 1997, 72: 107-116.
- [8] BLOCKEN B, CARMELIET J. Overview of three state-of-the-art wind-driven rain assessment models and comparison based on model theory[J]. Build En-

- viron 2010,45:691-703.
- [9] ABUKU M, BLOCKEN B, NORE K. On the validity of numerical wind-driven rain simulation on a rectangular low-rise building under various oblique winds[J]. Build Environ 2009,44(3):621-632.
- [10] BRIGGEN P M, BLOCKEN B, SCHELLEN H L. Wind-driven rain on the facade of a monumental tower: numerical simulation, full-scale validation and sensitivity analysis [J]. Build Environ 2009; 44 (8): 1675-1690.
- [11] HUANG S H, LI Q S. Numerical simulations of wind-driven rain on building envelopes based on Eulerian multiphase model[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 2010,98:843-857.
- [12] SANKARAN R, PATERSON DA. Computation of rain falling on a tall rectangular building [J]. Wind Eng. Ind. Aerodyn,1997,72:127-136.
- [13] 吴小平. 低层房屋风雨作用效应的数值研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
WU Xiaoping. Numerical study of wind-rain Interaction effect on low-rise buildings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008
- [14] 张丽. 土楼夯土墙风雨撞击荷载研究[D]. 厦门:华侨大学,2012.
ZHANG Li. The research of the impact load of rain induced wind on rammed earth wall of earth building [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2012.
- [15] 郑永鑫. 低矮建筑风驱雨作用的数值模拟与实测方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
ZHENG Yongxin. Numerical and site experimental study for wind-driven rain on low-rise buildings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [16] KUBILAY A, DEROME D, BLOCKEN B. CFD simulation and validation of wind-driven rain on a building facade with an Eulerian multiphase model[J]. Building and Environment,2013, 61: 69-81.
- [17] 王辉,李新俊,潘竹. 建筑(群)立面风驱雨压荷载的数值模拟研究[J]. 土木工程学报,2014,47(9):94-100.
WANG Hui, LI Xinjun, PAN Zhu. Numerical and site experimental study for wind and rain effects on low-rise buildings[J]. China Civil Engineering Journal,2014,47(9):94-100.
- [18] 韩涵. 建筑(群)立面风驱雨分布特性的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.
HAN Han. Research on Distribution Characteristics of Wind-driven Rain on Building Envelopes [D]. Hefei: Hefei University of Technology,2013.

(编辑 桂智刚)

(上接第 469 页)

- [9] 赵鸿铁,董春盈,薛建阳,等. 古建筑木结构透榫节点特性试验分析[J]. 西安建筑科技大学(自然科学版), 2010,42(3):315-318.
ZHAO Hongtie, DONG Chunying, XUE Jianyang, et al. The experimental study on the characteristic of mortise-tenon joint historic timber buildings [J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2010, 42(3):315-318.
- [10] 李忠献. 工程结构试验理论与技术[M]. 天津:天津大学出版社,2004.
LI Zhongxian. Test theory and technology of engineering structures [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2004.
- [11] NAKAGAWA T, OHTA M. Collapsing process simulations of timber structures under dynamic loading I: simulations of two-story frame models [J]. Journal of Wood Science, 2003, 49:392-397.
- [12] CHANG W S. Research on rotational performance of traditional Chuan-Dou timber joints in Taiwan [D]. Taiwan: National Chen Kung University, 2006.
- [13] 周乾,闫维明. 古建筑榫卯节点抗震加固数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(3):23-27.
ZHOU Qian, YAN Weiming. Numerical simulation on strengthening for earthquake resistance of tenon-mortise joints of ancient building [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(3): 23-27.
- [14] KING W S, YEN J Y, YEN Y N. Joint characteristics of traditional Chinese wooden frames [J]. Engineering Structure, 1996, 18(8):635-644.

(编辑 桂智刚)