

文章编号:0258-1825(2011)06-0765-05

风雪运动数值模拟中自保持平衡边界条件研究

李雪峰^{1,2}, 周炬毅¹, 顾明¹

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海市城市建设设计研究院, 上海 200125)

摘要:在目前风场自保持性研究的基础上,结合等效物理粗糙高度,给出一类近似满足自保持性的用于风雪运动数值模拟的边界条件。首先结合低温风洞实验室的风雪实验数据,把文献的方法应用于风雪运动数值模拟中。经对比验算发现,文献的方法应用于风雪数值模拟中不能很好满足自保持性。为了进一步满足自保持性要求,引入等效物理粗糙高度,建立起雪跃移高度与等效物理粗糙高度的关系。结果表明:通过引入等效物理粗糙高度,边界条件的自保持特性得到了进一步的提高。最后对该方法的应用进行了推广验证。

关键词:等效物理粗糙高度;平衡边界条件;风雪运动;雪跃移高度

中图分类号:TU312.1

文献标识码:A

0 引言

在一些多雪的地区,建筑物周围的积雪在风力的作用下会发生复杂的风雪运动,给人们的生活带来诸多不便。许多学者采用了风洞实验或现场实测来研究建筑物周围的雪漂移情况。然而风洞实验受到实验条件和实验准则的限制,往往要花费大量的人力物力;现场实测则容易受到自然条件的影响,并且实测周期较长。因此,CFD数值模拟技术近年来被广泛应用于研究建筑物周围的风雪运动。

数值模拟计算首先要考虑边界条件的给定。适当的边界条件能很好地满足自保持性要求,即让来流通过没有任何障碍物的计算域,入口的速度和湍动能剖面能维持到出口边界上保持不变。由于风雪运动数值模拟的基础是风场的模拟,因而风雪运动的模拟也涉及到该问题。风雪运动中,雪颗粒在风的作用下,发生漂移运动,雪颗粒传输率与气流作用在雪面上的剪切力等因素有关。在开阔的流域,当风速一定时,雪漂移会随距离的增加而达到一种稳定状态。在数值模拟时,如果来流边界条件不具有自保持性,即随着距离的增加,风速剖面并不能保持不变,就会对雪漂移的稳定造成很大的影响,使得数值模拟失真。因此研究风雪运动中边界条件的自保持是研究风雪运动的基础性工作。1998年

Naa'im^[1]和1999年Tominaga^[2]在进行风雪运动数值模拟时采用的湍动能入口沿高度为常数。2004年Beyers^[3]在缺乏雪漂移时湍动能入口资料的情况下,采用了完全发展湍流的入口边界。2007年周炬毅^[4]和2008年李雪峰^[5]采用的湍动能入口则是日本建筑协会提出的湍流度经验公式,没有考虑雪漂移对风速的影响。

2009年Yi Yang和Ming Gu^[6]对边界条件的自保持性进行了研究,结合风洞实验数据给出一类近似满足自保持性的边界条件。文献[6]虽然涉及到边界条件自保持性的研究,但所运用的算例仅仅是风场,而没有涉及到风雪运动模拟,国内外文献也没有对风雪运动数值模拟中边界条件是否满足自保持性进行过考察。为此,本文首先结合低温风洞实验室风雪运动的实验数据,将文献[6]的方法应用于风雪运动数值模拟。经过对比验算发现,相比其他文献,文献[6]所给边界条件的自保持性有所提高,但湍动能入口和出口剖面仍有较大差别。为了进一步提高风雪运动模拟过程中大气边界层的自保持性,文中引入等效粗糙高度,通过合理设置等效物理粗糙高度,可较好地达到自保持性要求,使风速和湍动能入口与出口剖面基本保持一致。

1 入口边界条件

1.1 不同文献的入口边界条件

风雪运动数值模拟的风速边界条件通常采用由雪

* 收稿日期:2010-07-20; 修订日期:2011-07-08

基金项目:科技部国家重点实验室基金(SLDRCE10-B-04, SLDRCE08-A-03);国家自然科学基金创新研究群体科学基金(50621062)

作者简介:李雪峰(1980-),男,山西吕梁人,博士,研究方向:建筑结构防灾。E-mail: foxlixuefeng@hotmail.com

面摩擦速度和雪面粗糙高度表达的对数律风速剖面,见式(1)。

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \ln(z/z_0) \quad (1)$$

湍流边界条件考虑了四种情况,见表1。Case1是Naaim^[1]风雪数值模拟中采用的湍流边界条件。Tomina-ga^[2]在计算时也采用了此类湍流边界条件,只是模型参数的取值与Naaim略有不同。该类湍流边界条件假定湍动能和湍动能耗散率不沿高度变化,然而实际情况并非如此。无论风洞实验还是现场实测均表明,湍流参数随高度而改变。Case2是Beyers^[3]采用的完全发展湍流的边界条件。Case3是周炬毅^[4]采用的湍流边界条件,湍动能参考日本建筑协会的A类地貌湍流经验公式取值。Case4为文献[6]给出的湍流边界。该边界考虑了湍流参数随高度的变化,与实际情况更加吻合,其中 D_1 、 D_2 为常数,通常根据实验或实测的数据拟合得到。

表1 湍流边界条件

Table 1 Turbulent boundary condition

	湍动能	湍动能耗散率	文献来源
Case1	$k = \sigma_k \frac{(c_{e2} - c_{e1})}{K^2} u_*^2$	$\varepsilon = \sigma_\varepsilon \frac{(c_{e2} - c_{e1})}{K^2} \frac{u_*^3}{K}$	文献[1]
Case2	$k = 10^{-4} u(z)^2$	$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{0.1h}$	文献[3]
Case3	$k = 1.2(uI)^2$, $I = 0.1 \left(\frac{z}{H_g} \right)^{-\alpha-0.05}$	$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{Kz}$	文献[4]
Case4	$k = \sqrt{D_1 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + D_2}$	$\varepsilon = C_\mu^{1/2} k(z) \frac{\partial U}{\partial z}$	文献[6]

1.2 适用性验证

采用日本Okaze^[7]低温风洞实验室的风雪实验数据对上述四种边界条件的适用性进行验证。

1.2.1 风雪实验介绍

2008年Okaze^[7]在日本新庄的低温风洞实验室采用真实雪颗粒进行风雪实验,研究了雪颗粒运动对风剖面的影响。实验室工作段尺寸为14m×1m×1m(长×宽×高)。实验中需要采用超声波风速仪测量不同位置、不同高度共36个测点处的风雪运动时的风速。由于仪器数量的限制,每次实验只能测得一个测点,为了保证数据匹配,在进行每次实验前,都需要恢复到初始状态,而且要尽量使初始状态(积雪厚度、均匀程度、密实程度、等等)相同,因此实验需要花费较大的人力和

物力,实验时间也较长。已有的文献很少有雪颗粒运动对风剖面影响的实验数据或实测数据,因此本文选取该实验用于研究雪颗粒对风剖面的影响。

应用文献[6]的公式,对实验数据进行拟合。拟合所得结果见图1。从图1可以看出,风速和湍动能剖面对近壁面测点拟合较好,中间测点拟合较差。由于风雪运动对近壁面处风速的影响最大,故采用如图所示拟合曲线。拟合所得公式见式(2)和式(3)。

$$u(z) = \frac{0.3676}{K} \ln(z/0.0001) \quad (2)$$

$$k(z) = \sqrt{-0.0297 \ln(z/0.0001) + 0.2474} \quad (3)$$

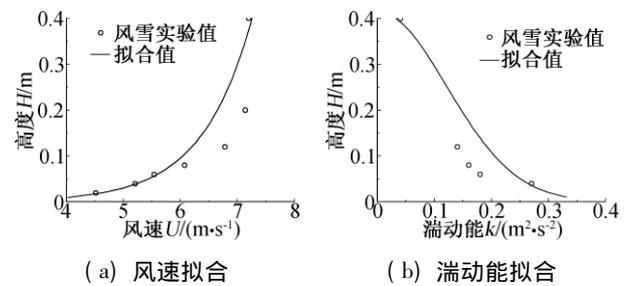


图1 入口边界条件拟合

Fig. 1 Fitted inlet boundary condition

1.2.2 计算方案

考虑到2D模型和3D模型对空风洞的实验结果影响较小,本文采用2D数值模型进行模拟,分别以表1中的四类入口边界进行计算。模拟采用计算流体力学通用软件FLUENT进行,物理粗糙高度取为0。根据测点的分布,计算域取4m×0.4m($x \times z$),其中 x 表示流向方向, z 表示竖向方向。计算域中没有任何障碍物,采用非均匀结构化网格。靠近地面采用边界层网格,沿高度方向最小网格尺寸为0.004m,网格增长因子为1.02,无量纲距离 $y^+ = \Delta y u_* / \nu$ 为60左右,在合理范围内(Δy 表示沿壁面法线方向到壁面的距离);沿长度方向最小网格尺寸为0.03m,网格总数为5320。

1.2.3 结果分析

图2给出了四种计算工况下,入口与出口的风速比较。从图2可以看出,Case1出口风速与入口相比,越远离或越靠近壁面差别越大。近壁面处最大相差达到20%;远壁面处最大差别为3%;Case2的出、入口风速吻合较好,最大差别为7%;Case3出口风速与入口差别较大,最大达到34%。Case4出口风速和Case1出口风速较接近,规律也同Case1,近壁面处最大相差20%。

图3给出各计算工况入口和出口湍动能的比较结果。Case1给出的湍动能沿高度为常数,但出口的湍动

能沿高度不再保持为常数, 出口湍动能较入口偏小至少 50%; Case2 给出的湍动能入口与速度的平方成比例, 即随着高度的增加, 湍动能会变大, 显然与实际不符, 并且出口与入口比较相差较大, 尤其靠近壁面处差别更大; Case3 采用了日本建筑协会建议的湍流公式, 出口与入口相比相差至少 40% 以上; Case4 出口与入口中间段吻合较好, 远壁面处和近壁面相差也较大, 近壁面处最大相差 36%, 远壁面处最大相差 30%。

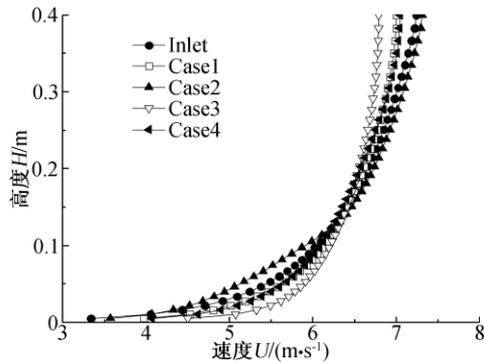


图 2 出口与入口风速比较

Fig. 2 Comparison of outlet and inlet velocities

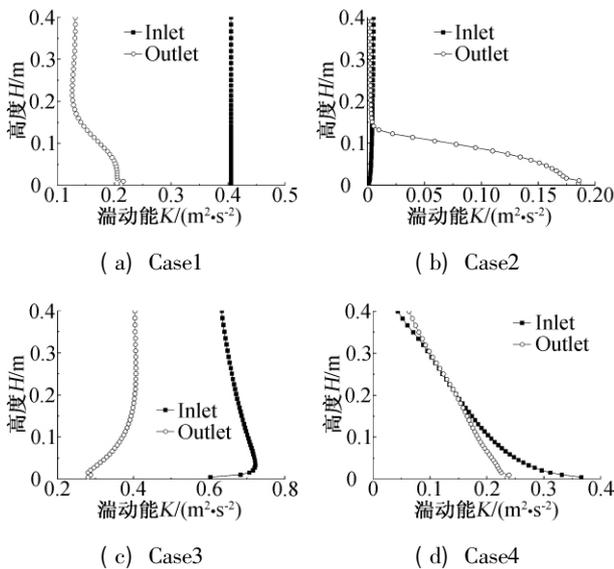


图 3 出口与入口湍动能比较

Fig. 3 Comparison of outlet and inlet turbulent kinetic energy

相对而言, Case4 的湍流入口更加符合实际, 但计算时物理粗糙高度 K_s 取为 0, 使壁面处的湍动能有所减小, 造成出口风速和湍动能与入口仍有不小差别。风速最大差别达到 20%, 湍动能最大差别达到 36%。物理粗糙高度取 0 与实际情况不相符, 并且没有考虑雪颗粒跃移运动引起的气动粗糙度对风剖面的影响。因此文

后引入等效物理粗糙高度 K_{sep} , 用于考虑气动粗糙度对风剖面的影响。下标 sep 代表等效的意思。

2 雪面等效物理粗糙高度 K_{sep} 的表达形式

1964 年 Owen^[8] 提出跃移发生时跃移高度和粗糙高度都与 u_*^2 成比例, 即:

$$h_{sal} = C_h \frac{u_*^2}{2g}, z_0 = C_z \frac{u_*^2}{2g} \quad (4)$$

式中 C_h 和 C_z 分别是与跃移高度和粗糙高度对应的比例常数。下标 sal 代表雪跃移运动。从上式可以看出 h_{sal} 与 z_0 成比例。Owen 随后建议对于风沙运动, C_h 可取为 1.6。1981 年 Kikuchi^[9] 测量了风雪运动雪的跃移高度, 认为该常数同样适合于风雪运动。该常数也被很多风雪研究者所接受和引用。本文也采用该常数, 即雪颗粒的跃移高度表达为:

$$h_{sal} = 1.6 \frac{u_*^2}{2g} \quad (5)$$

一般情况下, 壁面都是有粗糙度的。粗糙度会改变壁面附近壁面剪应力的分布, 从而改变壁面附近的平均速度分布, 进而影响其它物理量的分布。对于雪面来说, 雪颗粒的跃移运动相当于在雪面上形成了一个气动粗糙度, 而对风剖面的影响相当于壁面的粗糙度有所提高。

对于近壁面的风速, 可由壁面定律^[10] 描述如下:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{K} \ln\left(\frac{u_* z}{\nu}\right) + C \quad (6)$$

式中 C 为无量纲积分常数。测量表明^[10], 在光滑壁面条件下 $C = 5.5$ 。

对于有着平均物理粗糙高度为 K_s 的粗糙表面, 壁面定律仍然成立, 但此时 C 是物理粗糙高度 K_s 的函数。定义无量纲粗糙高度为:

$$K_s^+ = \frac{u_* K_s}{\nu} \quad (7)$$

对于较大 $K_s u_* / \nu$ ($K_s u_* / \nu \approx 80$ 以上), Nikuradse^[11] 的测量表明:

$$C \approx 8.5 - \frac{1}{K} \ln K_s^+ \quad (8)$$

把 C 值代入方程 (6), 则对于粗糙壁面有

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{K} \ln\left(\frac{y}{K_s}\right) + 8.5 \quad (9)$$

由式 (1) 和式 (9) 可得:

$$K_s = z_0^{8.5K} \quad (10)$$

从式(7)知 h_{sal} 与 z_0 成比例,故物理粗糙高度与跃移高度 h_{sal} 也成比例。引入等效粗糙高度,假定雪面等效物理粗糙高度与雪的跃移高度成比例,

$$K_{seq} = a \times h_{sal} \quad (11)$$

式中 a 为比例系数,通过数值实验调整其取值,使边界条件的自保持性进一步更好满足。物理粗糙高度直接在 FLUENT 中设置。

3 算例验证

本小节仍以 Okaze 的风雪实验为例考察等效物理粗糙高度对边界条件自保持性的影响。图4给出了不同等效物理粗糙高度对计算结果的影响。由图可见, K_{seq} 对湍动能的影响较大。随着 K_{seq} 的增大,出口与入口风速和湍动能的误差都是先减小后增大。当 $K_{seq} = 0.15h_{sal}$ (其中 h_{sal} 由式(5)确定),风速的差别最小(最大差别为1.5%)。当 $K_{seq} = 0.10h_{sal}$ 时,湍动能的差别最小(最大差别为10%)。

综合考虑 $K_{seq} = 0.10h_{sal}$ 时风速最大差别为7%,近壁面湍动能最大差别为10%; $K_{seq} = 0.15h_{sal}$ 时风速最大误差为1.5%,近壁面湍动能最大差别为14%。因此本文推荐进行风雪数值模拟时,等效物理粗糙高度可取为 $K_{seq} = 0.10h_{sal} \sim 0.15h_{sal}$ 。

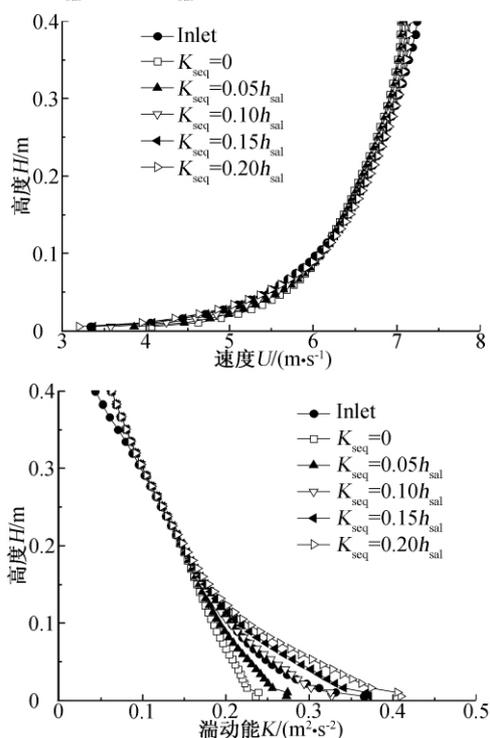


图4 不同等效物理粗糙高度的计算结果

Fig.4 Results with different equivalent physical roughness heights

4 推广应用

文中采用的边界条件是把文献[6]方法应用于风雪实验得到,通过合理设置等效物理粗糙高度,很好地满足了边界条件自保持性要求。为了进一步验证等效物理粗糙高度的适用性,另取几种不同风速进行验证。

不同风速情况下,入口湍动能可根据比例变换得到。在风雪运动模拟中,可近似忽略不同风速对湍流度和粗糙高度的影响,认为湍动能与壁面摩擦速度的平方成正比:

$$\frac{k(z)}{k'(z)} \approx \frac{u^2(z)}{u'^2(z)} = \left[\frac{u_*}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]^2 / \left[\frac{u'_*}{K} \ln\left(\frac{z'}{z'_0}\right) \right]^2 \approx \left(\frac{u_*}{u'_*} \right)^2 \quad (12)$$

根据式(12)可对上文拟合所得湍动能表达式(3)进行比例变换,得到不同风速下的边界入口。图5给出从 $u_* = 0.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $0.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $0.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 三种工况下,出口与入口风速和湍动能的比较。计算时,等效物理粗糙高度取 $K_{seq} = 0.15h_{sal}$ 。从图中可以看出,三种计算工况风速和湍动能都吻合较好。

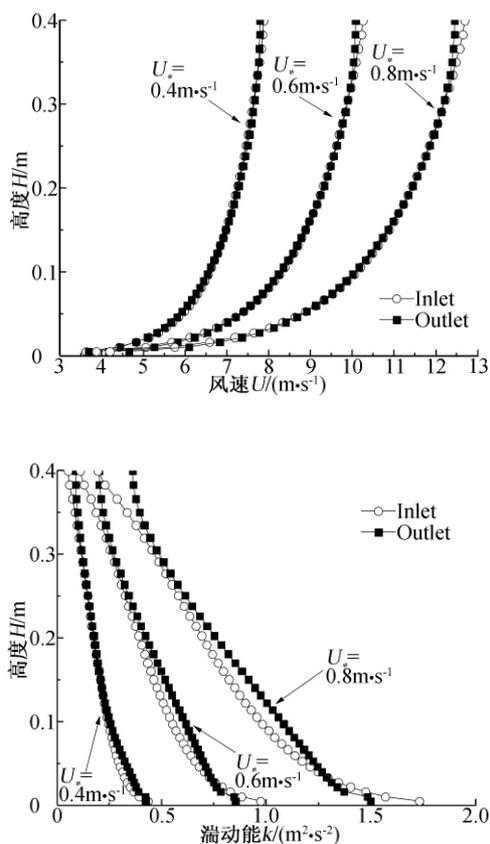


图5 出口与入口风速与湍动能比较

Fig.5 Comparison of outlet and inlet boundary

5 结 论

边界条件的自保持性是正确模拟风雪运动的重要条件。本文把文献[6]的方法应用于风雪运动的数值模拟。虽然比其他文献所给风雪运动的边界条件自保持性有所提高,但结果仍不能令人满意。为了更好的满足自保持性要求,引入雪面等效物理粗糙高度,建立起等效物理粗糙高度与雪跃移高度的关系,通过数值实验得到了比例系数的在0.10~0.15之间取值,该范围可推广应用于风雪运动数值模拟。通过本文研究表明,合理设置物理粗糙高度的取值,可进一步满足风雪运动数值模拟时边界条件自保持性的要求。

参 考 文 献:

- [1] NAAIM M, NAAIM B F, MARTINEZ H. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models[J]. *Annals of glaciology*, 1998, 26: 191-196.
- [2] TOMINAGA Y, MOCHIDA A. CFD prediction of flowfield and snowdrift around a building complex in a snowy region[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 81(1-3): 273-282.
- [3] BEYERS J H M, SUNDSBO P A, HARMS T M. Numerical simulation of three-dimensional, transient snow drifting around a cube[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004, 92(9): 725-747.
- [4] 周晖毅, 顾明, 朱忠义, 等. 首都国际机场3号航站楼屋面雪荷载分布研究[J]. *同济大学学报*, 2007, 35(9): 1193-1196.
- [5] 李雪峰, 周晖毅, 顾明. 北京南站屋面雪荷载分布研究[J]. *建筑结构*, 2008, 38(5): 109-112.
- [6] YANG Y, GU M, CHEN S, et al. New inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(2): 88-95.
- [7] OKAZE S, MOCHIDA A, TOMINAGA Y, et al. Modeling of drifting snow development in a boundary layer and its effects on wind field[A]. *Snow Engineering VI* [C]. Whistler, Canada: Snow Engineering VI Organizing Committee, 2008.
- [8] OWEN P R. Saltation of uniform grains in air[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1964, 20: 225-242.
- [9] KIKUCHI T. A wind tunnel study of the aerodynamic roughness associated with drifting snow[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1981, 5(2): 107-118.
- [10] 普朗特, 等. 流体力学概论[M]. 郭永怀, 等译. 科学出版社, 1981.
- [11] NIKURADSE J. Stromungsgesetz in rauhen rohren [R]. vdi-forschungsheft 361, 1933. (English translation: Laws of flow in rough pipes [R]. NACA Technical Memo 1292. Washinton DC: National Advisory Commission for Aeronautics, 1950.)

A study on the self-sustaining equilibrium boundary condition of numerical simulation on snow drifting

LI Xue-feng^{1,2} ZHOU Xuan-yi¹, GU Ming¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Urban Construction Design and Research Institution, Shanghai 200125, China)

Abstract: Though adoption of the equivalent physical roughness height as a set of boundary condition, based on the current literature on the self-sustaining equilibrium boundary condition, is presented to simulate the wind field with snow movement. In the paper, the method of the literature is applied to fit the data from snow drifting experiments in cold laboratory firstly. By comparison, the self-sustaining equilibrium is found not to be satisfied well. In order to reach the requirement of self-sustaining equilibrium, the equivalent physical roughness height is adopted, and the relationship between the equivalent physical roughness height and the saltation height is developed. The results show that self-sustaining equilibrium is improved though setting the equivalent physical roughness height reasonably. Finally, the popularization and application of the method is verified.

Key words: equivalent physical roughness height; equilibrium boundary condition; snow drifting; saltation height