

屋面滑移雪荷载的简化计算方法

周昶毅¹, 张运清², 顾明¹, 孙鲁鲁¹

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 山东省交通规划设计院, 山东 济南 250031)

摘要: 利用屋面滑移雪荷载的模拟方法, 基于屋盖积雪层能量、质量平衡方程, 对我国几个代表性地区的屋面滑移雪荷载进行了模拟, 提出了我国南北地区滑移雪荷载系数的简化计算公式, 并将简化计算的结果与一些国家规范方法的结果进行了比较。

关键词: 建筑屋面融雪模型; 滑移雪荷载; 滑移雪荷载系数; 简化计算公式; 荷载规范

中图分类号: TU312

文献标志码: A

Simplified Calculation Formula on Sliding Snow Load on Roof

ZHOU Xuanyi¹, ZHANG Yunqing², GU Ming¹, SUN Lulu¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute, Ji'nan 250031, China)

Abstract: The building roof snowmelt model, which was based on the previous mass and energy balance models, was adopted to compute the sliding snow loads on roofs in several typical countries. A simplified calculation formula that could compute the coefficient of sliding snow load was given. And a comparative study was made between the results from the simplified calculation formula and those from the load codes of some countries.

Key words: building roof snowmelt model; sliding snow load; coefficient of sliding snow load; simplified calculation formula; load code

堆积在建筑屋面上的积雪易形成不稳定的高空滑落物, 可能威胁建筑周围的行人及车辆。若存在相邻的低矮建筑, 滑落的雪块将增加邻近低矮建筑屋顶上的雪荷载。因而, 滑移雪荷载是各国荷载规范中屋面雪荷载的重要组成部分。目前关于建筑屋盖滑

移雪荷载的研究很少。Sack 等^[1]利用试验数据对屋面积雪滑落进行预测, 把积雪滑落的原因归结于屋面积雪受力的不平衡, 并提出了预测屋面积雪滑落的概率模型。Lepage 等^[2]提出了一种结合数值模拟和风洞、水槽试验的方法, 用于预测积雪在倾斜屋面的积累量以及滑落的情况。Isyumov 等^[3]基于气象数据, 预测了积雪坠落发生的频率。周昶毅等^[4]建立的建筑屋面融雪模型吸取了前人研究的成果, 并针对建筑屋面积雪的特点加以改进。在工程实践中, 荷载规范是指导工程设计的主要途径。结构工程师一般采用规范规定的方法计算屋面滑移雪荷载, 规范中滑移雪的取值一般来源于有限的观测数据。ISO 规范^[5]和一些国家的荷载规范, 如欧洲规范^[6]、加拿大规范^[7]、美国规范^[8], 都有针对高低屋盖中低屋盖表面上来自高屋盖的滑落雪荷载的规定。

然而, 尽管文献[1-4]对滑移雪荷载的机理进行了研究, 却没有提出适合工程人员使用的简化计算方法。本文基于屋面滑移雪荷载的模拟方法^[4], 对我国几个代表性地区的屋面滑移雪荷载进行了模拟, 分析了几个关键性因素对建筑滑移雪荷载的影响。最后, 为方便结构工程师的使用, 提出了滑移雪荷载系数的简化计算公式, 将其表达为建筑屋面传热系数与邻近建筑遮挡率的函数。同时将简化计算公式得到的结果与一些国家规范方法的结果进行对比。

1 屋面滑移雪荷载的模拟方法^[4]

文献[4]中的屋面滑移雪荷载模拟方法主要包括基于能量、质量平衡的建筑屋面融雪模型和屋面雪层开始滑移的判定条件。建筑屋面融雪模型中的能量平衡方程为

$$\frac{dU}{dt} = Q_{\text{net}} = S_n + L_a - L_t + H + E_l + Q_p + Q_r \quad (1)$$

收稿日期: 2013-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(51278368, 51478359), 科技部国家重点实验室基金(SLDRCE14-B-10)

第一作者: 周昶毅(1975—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为结构风工程、雪工程。E-mail: zhouxytj@tongji.edu.cn

式中:内能 U 是定义在单位面积上的状态量,且是相对于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的固态水定义的; Q_{net} 为单位时间步内积雪层能量变化率; S_n 为屋面吸收的短波辐射; L_a 为大气长波辐射; L_r 为雪面长波辐射; H 为显热; E_l 为潜热; Q_p 为降水(雨/雪)所带来能量; Q_i 为建筑内部的传热。

建筑屋面融雪模型中的雪层质量平衡方程如下:

$$\frac{dW}{dt} = P_r + P_s - M_{\text{out}} - W_E \quad (2)$$

式中: W 为水当量,同样是定义在单位面积上的状态量; P_r 为降雨量; P_s 为降雪量; M_{out} 为融雪率; W_E 为升华或冷凝引起的质量变化。

屋面积雪融化的内在动力来源于周围环境及建筑物内部对其的能量输入输出,图 1 给出了建筑屋面融雪过程中所涉及到的能量类型.建筑屋面融雪模型吸取了前人的成果,并针对建筑积雪的特点加以改进,使之能够更合理地描述空气-积雪层-建筑屋盖表面三者之间的能量、质量转移过程,如利用屋盖高度的风速来考虑显热、潜热,考虑了建筑传热以及邻近建筑遮挡等影响因素。

文献[4]将积雪中的液态水超过积雪最大持水量(取雪层雪水当量的 3% 作为积雪最大持水量^[9])时作为雪层滑移开始的判定条件,而与屋盖的坡角无关。

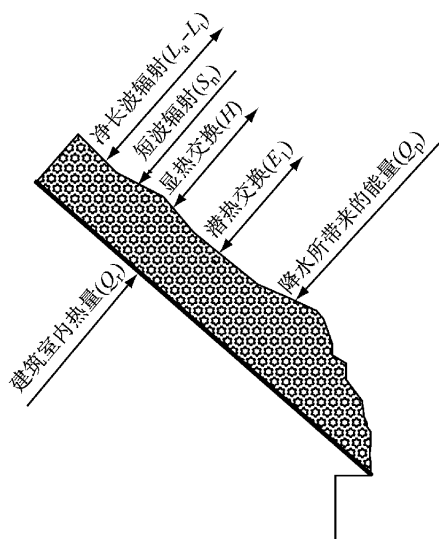


图 1 与建筑屋面融雪相关的输入输出能量

Fig.1 Energy fluxes involved in snowmelt on a roof

2 屋面滑移雪荷载的模拟

通过查阅不同地区的气象资料,选择了我国南

北方降雪量较大且具有代表性的几个地区,即沈阳、乌鲁木齐、甘孜、南京、武汉、北京,作为本文的研究对象.它们地理位置如图 2 所示,分别代表我国东北、西北、中北、西南、东南及中南地区.上述地区的气象资料均来源于我国气象科学数据共享服务网站.本文选取代表性地区的气象资料均是自 1951 年 11 月 1 日起至 2011 年 3 月 31 日止的 60 个冬季气象数据.气象资料包括每天的平均风速、平均温度、日最高气温、日最低气温、相对湿度、降雪/雨量等.限于篇幅,图 3 仅给出了部分代表性地区某一冬季的气象资料.由于本文研究需要每小时的气象资料,因而在运用本文方法前先将气象数据进行插值得到所需的每小时气象资料。

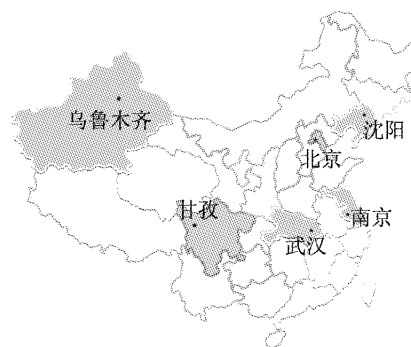


图 2 研究地区地理位置

Fig.2 Locations of the study regions

2.1 滑移雪荷载系数的定义

滑移雪荷载系数反映了高屋盖滑移至低屋盖的雪荷载与高屋盖屋面上总的雪荷载(坡度倾斜于低屋盖的一侧)之间的关系. ISO 规范及一些国家的规范都涉及到了高低屋盖中低屋盖表面滑移雪荷载的计算,并都有类似的定义.为了便于比较,这里定义滑移雪荷载系数 μ_s 为

$$\mu_s = \frac{s_s}{s} \quad (3)$$

式中: μ_s 为滑移雪荷载系数; s_s 高屋盖滑移至低屋盖的雪荷载; s 为高屋盖屋面上总的雪荷载(坡度倾斜于低屋盖的一侧)。

如果按照式(3)的定义,ISO 规范中滑移雪荷载系数还与高屋盖的长度有关,不是一个量纲一的系数.因此,沿用式(3)的定义,仅将本文结果与加拿大规范、欧洲规范、美国规范进行对比.加拿大规范、欧洲规范及美国规范规定高低屋盖中低屋面表面的滑移雪荷载分别为邻近高屋盖雪荷载(坡度倾斜于低屋盖的一侧)的 50%, 50% 及 40%, 亦即滑移雪荷载系数分别为 0.5, 0.5 及 0.4。

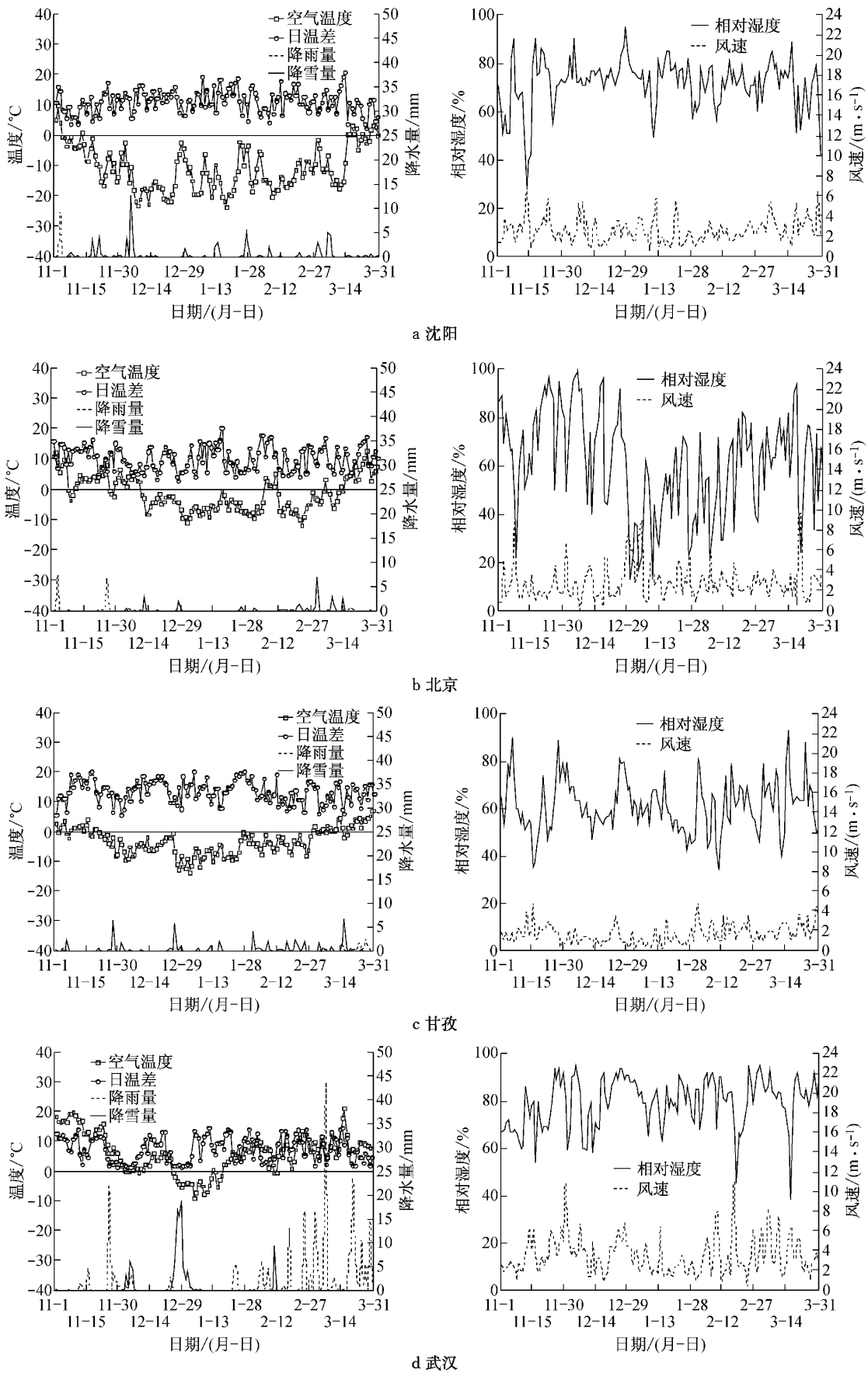


图 3 各地区某一冬季气象资料

Fig.3 Meteorological data in a certain winter of the regions

所在地区的气象资料对建筑屋面积雪滑落有较大的影响,除此之外,本文还考虑了邻近建筑对屋面雪层的遮挡效应以及建筑内部本身传热的影响。

邻近建筑遮挡主要影响短波辐射中的太阳直接辐射 D ^[10-11]。根据我国气象科学数据共享服务网站提供的各研究地区累年辐射量数据,可求得各地区太阳直接辐射 D 与辐射 SR (SR 为太阳直接辐射 D 与太阳散射辐射 S 的和)的比例关系,这样就可以对太阳直接辐射进行修正^[4]。由于南京与甘孜无此数据,这里分别用邻近地区上海和成都来代替。建筑屋面本身的传热特性(主要是屋面传热系数)不同,也会对建筑屋面积雪滑落产生影响。我国建筑节能规范^[12-14]要求屋面传热系数在 $0.2 \sim 1.5 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 之间,其中常见的屋面传热系数在 $0.4 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 左右。因此,文中标准屋面定义为传热系数等于 $0.4 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 且无邻近建筑遮挡的屋面,屋面顶部高度为 10 m ,建筑所处地貌为 B 类(此时地面粗糙度指数 α 为 0.16)。为计算建筑传热的影响,屋顶内侧的建筑内部空气温度统一取为 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

下面在与规范结果比较的同时将分析以上因素对建筑屋面积雪滑落的影响。待分析的几种屋面类型如表 1 所示。选取建筑屋面传热系数与邻近建筑遮挡率作为参数,是因为建筑屋面传热系数反映了不同地域对建筑保暖性能的要求,而邻近建筑遮挡率对辐射影响较大。

表 1 屋面类型
Tab. 1 Roof types

屋面类型	屋面传热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$)	邻近建筑 遮挡情况
标准屋面	0.4	无遮挡
屋面类型 1	0.4	20%遮挡
屋面类型 2	0.4	50%遮挡
屋面类型 3	0.4	80%遮挡
屋面类型 4	0.4	100%遮挡
屋面类型 5	0.2	无遮挡
屋面类型 6	0.6	无遮挡
屋面类型 7	0.8	无遮挡
屋面类型 8	1.0	无遮挡
屋面类型 9	1.5	无遮挡

注:100%遮挡即表示屋面雪层没有接受到太阳直接辐射。

2.2 滑移雪荷载系数的模拟

2.2.1 滑移雪荷载系数的计算过程

以沈阳地区无邻近建筑遮挡的标准屋面(即屋面传热系数为 $0.4 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$,见表 1)为例,说明本文屋面滑移雪荷载系数的计算过程。

2.2.1.1 基本雪压的计算

根据文献^[4]中的建筑屋面融雪模型,在不考虑

建筑传热情况下,本文结合研究地区的历史气象资料,得到了沈阳地区每年度积雪的最大水当量值。在计算地面雪压时不需要用到滑落判断条件。由于考虑了积雪的累积和融化效应,所得结果相当于空旷平坦地面上的地面雪压。图 4 给出了沈阳某一冬季内地面雪层水当量的变化规律。沈阳位于我国东北地区南部,辽宁省中部,以平原为主。冬季多降雪天气,同时因冬季寒冷时间较长,大部分时间气温低于零度,有利于积雪(见图 3)。因而该地区水当量值较大,整个冬季直至三月中旬积雪才开始融化。我国建筑结构荷载规范^[15]认为雪压年最大值服从极值 I 型的概率分布,从而得到了基本雪压随不同重现期的变化曲线,如图 5 所示。本文模拟的 50 年重现期下基本雪压为 $0.49 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$,我国建筑结构荷载规范^[15]中沈阳地区 50 年重现期下基本雪压的规范值为 $0.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$,与本文模拟值的误差为 2%,说明了本文方法计算基本雪压的准确性。

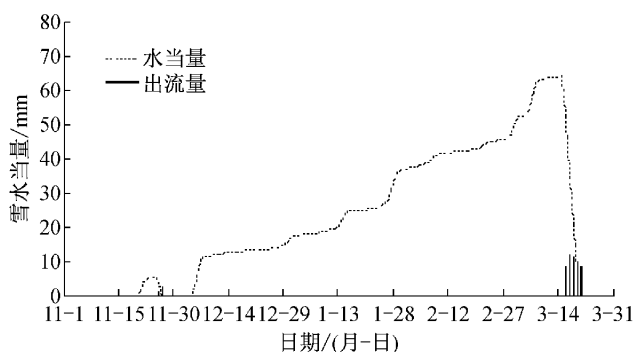


图 4 沈阳某一冬季地面水当量的变化过程

Fig. 4 Snow water equivalent in a certain winter on the ground (Shenyang City, China)

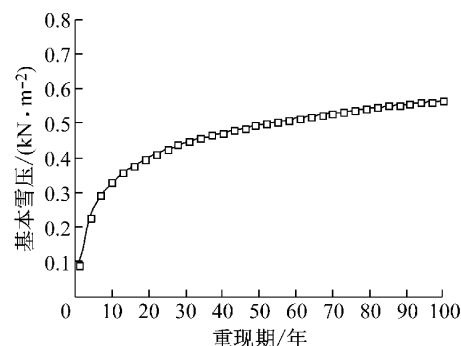


图 5 沈阳地区基本雪压(或屋面形状系数 $C_s = 1.0$ 时的高屋盖上总的雪荷载)随重现期变化的曲线

Fig. 5 Reference snow pressure (total snow load on the upper roof that slopes toward the lower roof when $C_s = 1.0$) as a function of the return period (Shenyang City, China)

2.2.1.2 高屋盖屋面雪荷载

本文以基本雪压乘以屋面形状系数 C_s 得到高

屋面雪荷载(与规范计算过程一致). 此处的屋面形状系数 C_s 包含了高屋盖外型(包括屋面倾斜坡角)等因素,考虑了高屋盖上雪迁移等效应. 图 5 即为 $C_s=1.0$ 时高屋面表面总的雪荷载,此时沈阳地区 50 年重现期下高屋面表面总的雪荷载为 $0.49 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$. 本文认为如果满足滑落条件,高屋面表面所有的积雪都将滑落下来,故没有关注高屋盖上某一具体位置的情况,只给出了高屋盖表面单位面积上的雪重量.

2.2.1.3 滑移雪荷载

运用文献[4]的屋面滑移雪荷载模拟方法,当输入研究地区气象资料的降雪/雨时,将降雪/雨量乘以屋面形状系数 C_s 作为屋面形状对堆积在屋盖表面积雪的影响因素. 当满足滑落条件时,积雪发生滑落,并于此时记录滑落时积雪单位面积重量. 可认为此时结果为高屋盖滑落至邻近低屋盖表面上的滑落雪荷载. 根据屋面积雪滑落情况,得到了沈阳地区屋面积雪滑落的发生次数与积雪滑落的单位面积重量. 计算结果表明,沈阳地区建筑屋面发生的积雪滑落事件所对应的单位面积重量大部分都小于 $0.05 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$,说明一般滑落事件发生时积雪单位面积重量并不大;然而,沈阳地区发生积雪滑落事件所对应的单位面积重量最大值为 $0.355 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$.

假设屋面积雪滑落事件历年最大单位面积重量服从极值 I 型分布^[3],对滑落事件进行概率统计分析,可得到不同重现期下屋面滑移雪荷载. 从图 6 可见,50 年重现期下屋面($C_s=1.0$)滑移雪荷载为 $0.31 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$.

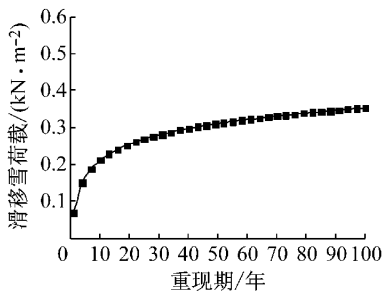


图 6 滑移雪荷载随重现期变化的规律

Fig.6 Sliding snow load as a function of return period

将图 6 的结果乘以高屋盖的面积,即得到了邻近低屋盖表面所承受的来自高屋盖的滑移雪荷载. 这里认为低屋盖的跨度大,以致能接受所有从高屋盖上滑落的积雪.

2.2.1.4 滑移雪荷载系数

由于单独计算滑移雪荷载与高屋盖屋面雪荷载

时均考虑了屋盖形状的影响,根据式(3)的定义,直接将 50 年重现期下图 6 的结果除以图 5 的结果,即可得到滑移雪荷载系数,即

$$\mu_s = \frac{s_s}{s} = \frac{0.31}{0.49} = 0.63$$

如果屋面形状系数 C_s 不为 1.0,图 5 和图 6 的结果就都需要乘以 C_s ,但这不会影响他们的比值——滑移雪荷载系数. 根据文献[4]的观点,当雪层与屋盖交界面全是液态水时,雪层与屋面之间的摩擦力接近零,此时即使屋盖坡角很小,雪层在重力作用下也会开始滑落. 从上面滑移雪荷载系数的计算过程可知,本小节的方法与此观点相一致. 即应用本文方法时,所得滑移雪荷载系数的结果与屋面形状或屋盖坡角无关.

2.2.2 滑移雪荷载系数模拟值与规范值的比较

图 7 给出了邻近建筑遮挡影响下滑移雪荷载系数模拟值与规范值的比较,此时屋面传热系数为 $0.4 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ (对应表 1 中屋面类型 1~4). 从图 7 可知,北方地区相对南方地区的滑移雪荷载系数要大. 这主要与其所处位置的气候条件有关. 乌鲁木齐地区的滑移雪荷载系数最大,主要因为其地处天山北坡,常受极地和西伯利亚冷空气侵袭,冬季寒冷漫长,温度低,屋面积雪可以保持整个冬季不融化. 沈阳位于我国东北地区南部,气候条件类似乌鲁木齐,该地区的滑移雪荷载系数也较大. 北京属于华北地区,西部是太行山余脉的西山,北部是燕山山脉的军都山,受地形影响降雪量较大,但冬季的严寒气候没有乌鲁木齐、沈阳明显,故滑移雪荷载系数相对要小一些. 甘孜处于高海拔地区,因温度低,屋面积雪不易融化,故甘孜虽然地处我国南部,但其滑移雪荷载系数相对较大(大于 0.5). 位于我国南方的南京与武

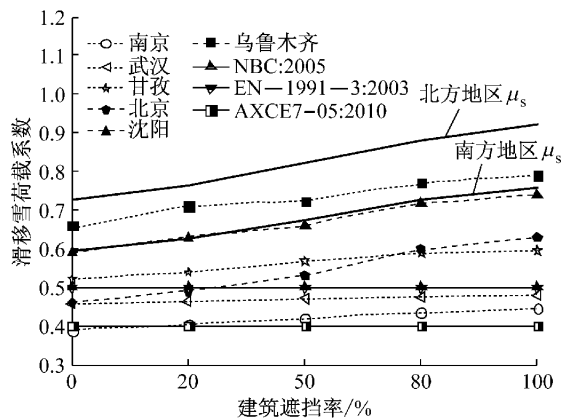


图 7 邻近建筑遮挡影响下的滑移雪荷载系数

Fig.7 Sliding snow load coefficient as a function of shielding rate

汉,积雪期较短,冬季温度一般较高,冬季常伴有降雨,屋面积雪易滑落,屋面滑落雪荷载系数均低于 0.5. 从图 3 中的气象资料也反映了这些地区的气象特点.

另外,对于每一个研究地区而言,随着遮挡率的增加,屋面滑落雪荷载系数也随之增加. 由于南北地区太阳直接辐射占短波辐射的比例不同,各研究地区的屋面滑落雪荷载系数随遮挡率的增长幅度也不同. 其中,北方地区增幅较大,平均增幅为 27%,南方地区增幅较小,平均增幅为 14%.

图 8 给出了建筑内部传热影响下滑移雪荷载系数模拟值与规范值的比较,此时屋面无邻近建筑遮挡(对应表 1 中屋面类型 5~9). 从图 8 可知,随着屋面传热系数的增加,各研究地区的屋面滑落雪荷载系数也随之降低. 当建筑屋面传热系数为 $1.5 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ (一般为温室屋顶)时,积雪难以在屋面堆积,屋面滑落雪荷载系数降至 0.1 以下. 另外,由于北方地区冬季空气温度低,室内外温差大,屋面滑落雪荷载系数随建筑屋面传热系数增加降低较快;南方地区则较慢.

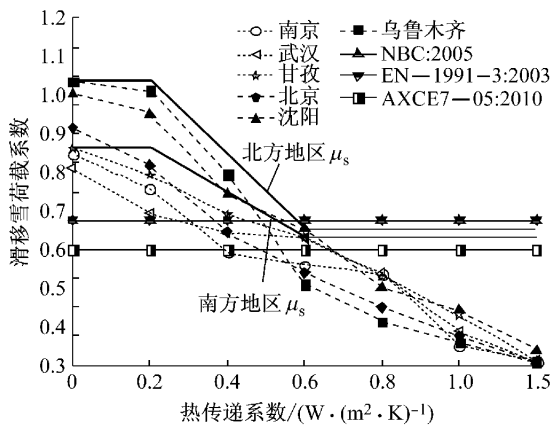


图 8 建筑传热影响下的滑移雪荷载系数(无邻近建筑遮挡)
Fig.8 Sliding snow load coefficient as a function of heat transfer coefficient (0% of the roof shielded)

2.3 滑移雪荷载系数简化计算公式

从以上分析可知,沈阳和乌鲁木齐的冬季有着明显的北方地域特点,南京和武汉则具有南方的特点. 而北京和甘孜的冬季兼具南北方特点,但更偏向北方. 为了方便起见,仍将北京和甘孜分属于北方与南方地区. 实际上,按照中国南北方的自然分界线(横贯中国东西的秦岭——淮河),甘孜应属于北方.

为了便于工程应用,基于上述模拟结果,对我国南北地区(主要考虑我国南北地区滑移雪荷载系数

的差异性)低屋盖表面滑移雪荷载系数分别进行了总结并归纳了简化计算公式,见式(4)、式(5).

北方地区

$$\mu_s = \begin{cases} 0.98(1+0.27P_{SA}) & K < 0.2 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1} \\ (1.235-1.275K)(1+0.27P_{SA}) & 0.2 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1} < K < 0.6 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1} \\ 0.47(1+0.27P_{SA}) & K > 0.6 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

南方地区

$$\mu_s = \begin{cases} 0.75(1+0.14P_{SA}) & K < 0.2 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1} \\ (0.905-0.775K)(1+0.14P_{SA}) & 0.2 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1} < K < 0.6 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1} \\ 0.44(1+0.14P_{SA}) & K > 0.6 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

式(4),(5)中: K 为建筑屋面传热系数; P_{SA} 为邻近建筑对高屋盖表面积雪的遮挡率. 屋面传热系数 K 限值的规定可根据民用建筑节能设计标准^[12~14]查取. 一般情况下,我国屋面的传热系数均在 $0.4 \sim 0.6 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 之间,严寒地区屋面的传热系数一般不超过 $0.2 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$. 因而简化计算公式中以传热系数 $0.2, 0.6 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 为分段点. 式(4),(5)分别对应图 7,8 中箭头所指粗直线. 由于简化计算公式是包络了无邻近建筑遮挡时的结果,因而在图 7 中对于传热系数为 $0.4 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 的情况,计算误差会略大一些.

3 结语

本文应用屋面滑移雪荷载模拟方法,基于屋盖积雪层能量、质量平衡方程,对我国几个代表性地区的屋面滑移雪荷载进行了模拟,分析了不同地区的气象特征、邻近建筑的遮挡、建筑屋面传热性质等因素对滑移雪荷载的影响. 计算结果表明以上 3 个方面均对积雪滑落产生一定程度的影响. 对北方与南方地区分别总结并提出了滑移雪荷载系数的简化计算公式,将其表达为建筑屋面传热系数与邻近建筑遮挡率的函数. 与各国规范关于滑落雪荷载的结果进行了对比,结果显示本文简化计算公式的结果比规范值更加精细化.

参考文献:

- [1] Sack R L, Arnholtz D, Haldeman S J. Sloped roof snow loads using simulation[J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1987, 113(8): 1829.
- [2] Lepage M F, Schuyler G D. A simulation to predict snow sliding and lift-off on buildings [C]//*Proceedings of the Engineering Foundation Conference on a Multidisciplinary Approach to Snow Engineering*. Santa Barbara: The Engineering Foundation, 1988: 128-141.
- [3] Isyumov N, Mikitiuk M. Sliding snow and ice from sloped building surfaces: its prediction, potential hazards and mitigation[C/CD]//*The 6th Snow Engineering Conference*. Whistler B C; [s. n.], 2008.
- [4] 周晖毅,张运清,顾明. 建筑屋面滑移雪荷载的模拟方法研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(6): 190.
ZHOU Xuanyi, ZHANG Yunqing, GU Ming. Method for simulation sliding snow loads on roofs [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(6): 190.
- [5] International Organization for Standardization. ISO4355 Bases for design of structures—determination of snow loads on roofs [S]. 2nd ed. Geneva: International Organization for Standardization, 1998.
- [6] British Standard Institution. EN1991-1-3; 2003 Eurocode 1—actions on structures—part 1-3: general actions—snow loads [S]. London: British Standard Institution, 2003.
- [7] National Research Council of Canada. National building code of Canada [S]. Ottawa: National Research Council of Canada, 2005.
- [8] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-10 Minimum design loads for buildings and other structures [S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [9] Butke J T. An evaluation of a point snow model and a mesoscale model for regional climate simulations [D]. Newark: University of Delaware, 1996.
- [10] Swift L W. Algorithm for solar radiation on mountain slopes [J]. *Water Resources Research*, 1976, 12: 108.
- [11] Elnahas M M, Williamson T J. An improvement of the CTTC model for predicting urban air temperatures [J]. *Energy and Buildings*, 1997(25): 41.
- [12] 中华人民共和国建设部. JGJ26—95 民用建筑节能设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. JGJ26—95 Energy conservation design standard [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1996.
- [13] 中华人民共和国建设部. JGJ134—2001 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. JGJ134—2001 Design standard for energy efficiency of residential buildings in hot summer and cold winter zone [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ26—2010 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban of the People's Republic of China. JGJ26—2010 Design standard for energy efficiency of residential buildings in severe cold and cold zones [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 50009—2012 Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [16] FU Yandi, FAN Hong, WANG Penggang. Life prediction of the concrete structure under chloride environment [J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2011, 32(4): 18.
- [19] Lu C H, Jin W L, Liu R G. Reinforcement corrosion-induced cover cracking and its time prediction for reinforced concrete structures [J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(4): 1337.
- [20] Chernin L, Val D. Prediction of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25: 1854.
- [21] Shi X M, Xie N, Fortune K, *et al.* Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: an overview [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 30: 125.
- [22] Geng C L, Xu Y M, Weng D, *et al.* A time-saving method to determine the chloride threshold level for depassivation of steel in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24: 903.
- [23] Ann K Y, Song H W. Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete [J]. *Corrosion Science*, 2007, 49(11): 4113.
- [24] Liu Y, Weyers R E. Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures [J]. *Cement and Concrete Research*, 1998, 28(3): 365.
- [25] Liu Y. Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [26] Djerbi A, Bonnet S, Khelidj A, *et al.* Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(6): 877.
- [27] Glass G K, Buenfeld N R. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete [J]. *Corrosion Science*, 1997, 39(5): 1001.
- [28] Suda K, Misra S, Motohashi K. Corrosion products of reinforcing bars embedded in concrete [J]. *Corrosion Science*, 1993, 35(5/8): 1543.

(上接第 1825 页)