

门式刚架柱间支撑设计风荷载计算分析

李庆铠, 宋明远, 秦 萌, 侯朝冲

(中国有色金属工业第六冶金建设有限公司, 河南 郑州 450006)

摘要: 门式刚架轻型房屋钢结构属于风荷载比较敏感建筑, 在实际设计过程中, 柱间支撑的设计往往会被忽视, 给结构安全留下隐患。文章结合现行通用规范修正风荷载计算公式, 简述柱间支撑风荷载计算过程中风荷载系数的理论计算方法, 并与经验取值所计算的风荷载系数进行对比分析, 最后以某项目柱间支撑风荷载计算的实例进行验证。结果表明: 应在现行《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》中风荷载计算方法的基础上, 按照《工程结构通用规范》中要求考虑风荷载放大系数的影响; 风荷载系数经验取值与理论取值最终得到的风荷载相差不大, 且前者更偏于保守, 鉴于经验取值的便捷性, 设计人员可按照经验取值用于实际项目设计。

关键词: 门式刚架; 柱间支撑; 风荷载

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)10-0072-04

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.10.136

Analysis on design wind load calculation of portal rigid frame column support

LI Qingkai, SONG Mingyuan, QIN Meng, HOU Chaochong

(China Nonferrous Metals Industry Sixth Metallurgical Construction Co., Ltd., Zhengzhou 450006, Henan, China)

Abstract: The steel structure of light housing with portal rigid frame is sensitive to wind load. In the actual design process, the design of inter-column support is often ignored, leaving hidden dangers to the structural safety. In this paper, the wind load calculation formula is modified based on the current general norms, and the theoretical calculation method of the stroke load factor in the calculation process of the inter-column supported wind load is briefly described, and the wind load calculated by the empirical value is compared and analyzed. Finally, the actual calculation example of the inter-column supported wind load of a project is verified. The results show that the effect of wind load amplification factor should be considered according to the requirements of the General Code for Engineering Structures on the basis of the current method of calculating the stroke load in the Technical Code for Steel Structures of light houses with rigid frame. There is little difference between the empirical value of the wind load factor and the theoretical value of the wind load, and the former is more conservative. In view of the convenience of the empirical value, designers can use the empirical value for practical project design.

Key words: portal rigid frame; intercolumn support; wind load

由于门式刚架轻型房屋钢结构具有自重较轻、工厂化制作、安装方便、造价合理等优点, 且结构受力简单、布置灵活、传力路径明确, 因此在工业厂房建筑中应用较为广泛^[1-2]。由于该类建筑属于

对风荷载比较敏感建筑, 在结构设计过程中风荷载的计算尤为关键。张正鹏等^[3]在考虑风荷载脉动影响下, 对门刚梁、柱的应力进行分析, 认为直接按照《工程结构通用规范》(GB 55001—2021)(下文

收稿日期: 2023-12-02

作者简介: 李庆铠(1995—), 男, 工程师, 从事工程管理工作。

中简称《通用规范》)规定的风荷载放大系数最小值,可能会导致结构计算偏于不安全。相震东等^[4]研究了低层轻型房屋的围护面板在风荷载作用下的计算,并给出了在不同工况下风荷载的计算规范参考。袁中亚等^[5]研究了龙卷风作用下高低屋面风荷载分布规律,得出了在不同坡角和涡流比情况下,屋面的风压分布影响规律差异较大。

基于前人研究,本文拟依据现行规范,并结合实际设计过程中的经验取值及项目实际算例,着重分析风荷载对柱间支撑设计的影响,以期为同类工程设计提供参考。

1 风荷载计算公式修正

《通用规范》发布后,针对其 4.6.5 条风荷载放大系数取值问题,与现行《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》(GB 51022—2015)(下文中简称《门刚规范》)4.2.1 条规定的放大系数 β 引起了广大学者的热议,有学者认为两者均需考虑,也有认为门刚结构无需考虑《通用规范》中放大系数,目前并未达成共识^[6]。基于此,目前应通盘考虑现行规范要求,对《门刚规范》中的风荷载计算公式进行修正。

门刚风荷载标准值计算公式^[7]:

$$W_k = \beta \mu_w \mu_z w_0 \quad (1)$$

式中: W_k 为风荷载标准值, kN/m^2 ; w_0 为基本风压, kN/m^2 ; μ_w 为风荷载系数; μ_z 为高度 z 处的风压变化系数,按照荷载规范取值; β 为提高系数。

参数 β 在《门刚规范》4.2.1 条规定计算主刚架时取 1.1,计算檩条、墙梁、屋面板和墙面板及其连接时取 1.5。相应的条文说明 4.2.1 条解释门式刚架属于风荷载敏感结构,对于主刚架 β 取 1.1 是对基本风压的适当提高(可将其理解为虽然基本风压按重现期为 50 a 取值,乘上该系数后近似提高为重现期 100 a);计算檩条及其他时取 1.5 是考虑阵风作用的要求。

《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)(下文中简称《荷载规范》)中,虽然 8.4.1 条中规定对于高度大于 30 m 且高宽比大于 1.5 的房屋,以及基本自振周期 T_1 大于 0.25 s 的各种高耸结构,应考虑风压脉动对结构产生顺风风振的影响,门

式刚架轻型房屋(房屋高度不大于 18 m,房屋高宽比小于 1)明显不适用于该条文。但是 8.4.2 条中说明风敏感建筑物应考虑风压脉动对结构产生风振的影响,该条显然是囊括门式刚架轻型房屋结构的。

《通用规范》4.6.5 条中规定,当采用风荷载放大系数的方法考虑风荷载脉动系数的增大效应时,主要受力结构风荷载放大系数应根据具体工况,取值不应小于 1.2;围护结构的放大系数应根据具体工况,取值不应小于 $1 + 0.7/\sqrt{\mu_z}$ 。4.6.5 条文说明中明确说明,对于主要受力结构,除了考虑风压本身的脉动之外,还要考虑风引起结构振动所带来的附加荷载;对于围护结构而言,只需考虑风压本身脉动的特性,本条规定了围护结构风荷载放大系数的下限值。

综上,在新的《门刚规范》未修订之前,笔者认为根据规范要求,对于门刚结构(风敏感建筑物)风荷载的计算可以进行如下修正。

(1) 针对主刚架, β 是对基本风压的适当提高,在此基础上还要按照《通用规范》考虑风荷载脉动系数的增大效应,修正风荷载计算公式:

$$W_k = \beta \beta_1 \mu_w \mu_z w_0 \quad (2)$$

式中: β_1 为风荷载放大系数,对于主要受力结构不小于 1.2。

(2) 针对围护结构, β 是考虑阵风作用提高参数,与《通用规范》中考虑的放大系数为同一参数,修正风荷载计算公式:

$$W_k = \beta_1 \mu_w \mu_z w_0 \quad (3)$$

式中: β_1 为风荷载放大系数,对于围护结构不小于 $1 + 0.7/\sqrt{\mu_z}$ 。

2 柱间撑风荷载计算分析

2.1 风荷载系数取值分析

柱间支撑主要承担和传递水平力(吊车纵向刹车力、风荷载、地震作用等),属于主刚架系统之一,相对而言风荷载的计算是一个难点,公式(2)中风荷载系数 μ_w 的取值尤为关键。针对常规封闭式双坡屋面,按照《门刚规范》第 4.2.2 条可得主刚架纵向风荷载系数表及附图(表 1 和图 1)^[7]如下:

表 1 主刚架纵向风荷载系数(封闭式)

荷载工况	端区系数				中间区系数				侧墙
	1E	2E	3E	4E	1	2	3	4	5、6
+i	+0.43	-1.25	-0.71	-0.61	+0.22	-0.87	-0.55	-0.47	-0.63
-i	+0.79	-0.89	-0.35	-0.25	+0.58	-0.51	-0.19	-0.11	-0.27

注: 1~6、1E~4E 代表图 1 中所示分区编号, +i、-i 分别代表风荷载压力及吸力工况。

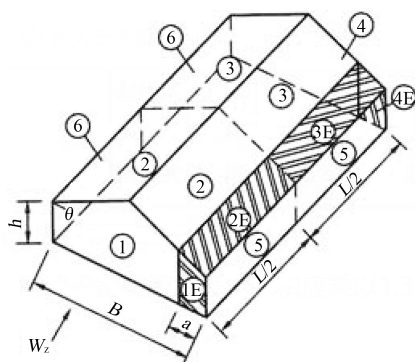


图 1 双坡屋面纵向

(1) 图 1 中房屋边缘带宽度 a 值计算:

$$a = \min(10\%B, 0.4h) \quad (4)$$

式中: a 为房屋边缘带宽度, 还应满足不得小于房屋最小尺寸的 4% 或 1 m, 单位为 m; B 为房屋水平尺寸, m; h 为屋顶至室外的平均高度, m。

(2) 系数 μ_w 的理论取值:

在表 1 所示两种荷载工况下, 对柱间支撑风荷载有影响的区域为 1、4、1E、4E 共计 4 个区域, 即两个端头均需考虑, 若简化作用在一个端面, 可得:

$$\mu_w = [(x_1 + x_2) \times A_1 + (x_3 + x_4) \times A_2] / (A_1 + A_2) \quad (5)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别代表图 1 中 1E、4E、1、4 分区的主刚架纵向风荷载系数; A_1 代表图 1 中 1E 区所占面积, m^2 ; A_2 代表图 1 中 1 区所占面积, m^2 。

(3) 系数 μ_w 的经验取值:

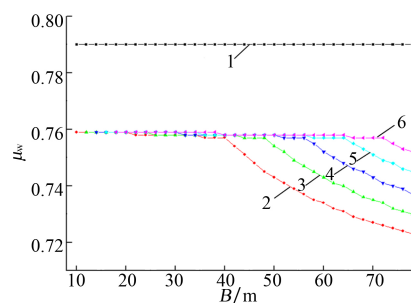
部分设计人员在实际工程中有时为方便计算仅选取表 1 中 -i 工况下 1E 区的参数 +0.79 作为系数 μ_w 的计算取值。

2.2 系数 μ_w 两种取值方法对比

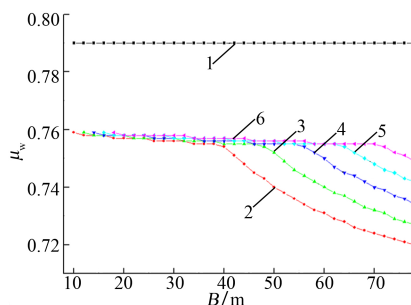
《门刚规范》5.2.2 条中规定单跨跨度宜取值为 12~48 m, 当有根据时可采用更大跨度; 第 5.2.3 条中规定屋面坡度宜取值为 1/8~1/20, 在雨水较多的区域宜取其中的较大值^[7]。

因此, 拟按照公式(5), 采用 Fortran 软件编

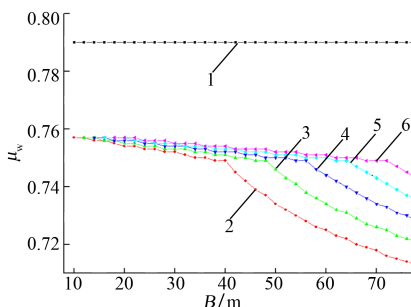
程计算, 取双坡屋面坡度分别在 1:20、1:10、1:5 工况下, 屋顶至室外的平均高度依次为 10、12、14、16、18 m, 在跨度区间为 10~70 m(保持房屋高宽比小于 1, 计算增量为 1 m)时参数 μ_w 的变化曲线如图 2~4 所示。



1— $\mu_w = 0.79$; 2— $h = 10$ m; 3— $h = 12$ m;
4— $h = 14$ m; 5— $h = 16$ m; 6— $h = 18$ m。

图 2 屋面坡度为 1:20 工况下参数 μ_w 的变化曲线

1— $\mu_w = 0.79$; 2— $h = 10$ m; 3— $h = 12$ m;
4— $h = 14$ m; 5— $h = 16$ m; 6— $h = 18$ m。

图 3 屋面坡度为 1:10 工况下参数 μ_w 的变化曲线

1— $\mu_w = 0.79$; 2— $h = 10$ m; 3— $h = 12$ m;
4— $h = 14$ m; 5— $h = 16$ m; 6— $h = 18$ m。

图 4 屋面坡度为 1:5 工况下

由图 2~4 可得, 双坡屋面 3 种坡度工况下, 按照式(5)计算得到了系数 μ_w 均低于经验取值参数(0.79)。系数 μ_w 的计算值均有随着跨度 B (10~70 m 区间内)的增大而降低的趋势, 图中显示曲线 2~16 中均有变小的突变点, 出现该情况的原因是, 房屋边缘带宽度 a 值应取跨度 B 的 10% 与 0.4 倍屋顶至室外平均高度 h 之间的最小值。突变点之前 a 值由前者控制, 之后由后者控制, 突变点对应的横坐标 B 值即为两者相等的位置。

此外, 还可发现随着屋面坡度的增大, 系数 μ_w 的实际值下降也越明显, 当 $h = 14$ m, 跨度依次为 18、24、36、48 m 时, 对应的详细参数如表 2 所示。

表 2 参数对照

B/m	坡度		
	1:20	1:10	1:5
18	0.759	0.758	0.756
24	0.759	0.758	0.755
36	0.758	0.756	0.753
48	0.758	0.755	0.750

3 实际案例计算分析

3.1 工程概况及受力分析

郑州市某新建单层门式刚架厂房, 其东西长度约为 84.73 m, 南北向跨度约为 25.48 m, 总建筑面积约 2 158.92 m^2 。檐口高度为 9 m, 双坡不上人屋面, 坡度为 1:10, 屋脊高度为 10.2 m, 屋面檩条高度加屋面板厚度为 0.35 m, 柱间距为 6 m, 总计 15 榀刚架, 纵向每侧拟设置 3 组柱间支撑(分别在端部及中间跨设置)。在实际工况中厂房端部设置有抗风柱也会承担一部分端部迎风面风荷载, 其传递路径为抗风柱上端→屋面支撑系统→柱间支撑 & 柱→基础。为便于计算, 在实际设计计算过程中, 可参考《新版钢结构设计手册》做法^[8], 假设全部纵向水平力均由柱间支撑承受, 将端部迎风面考虑为一个整体, 将柱间支撑上下端点看做支撑点来分配全部风荷载。本项目柱间支撑设计过程中, 忽略抗风柱影响, 端部迎风面风荷载计算简图如图 5 所示。

将总的风荷载 F 简化分解为 $F_1 \sim F_4$ 四个相等的力, 其中分量 F_3 和 F_4 由柱脚承担, F_1 和 F_2 由

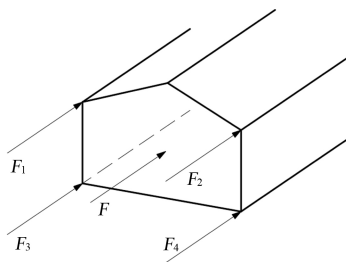


图 5 计算简图

柱间支撑承担。虽然根据《门刚规范》8.2.2 条规定“同一柱列设置的柱间支撑共同支撑该柱列的水平荷载, 水平荷载应按各支撑的刚度进行分配。”但是考虑到柱间支撑与柱的连接均为铰接, 这就会导致端部的柱间支撑在风荷载作用下会有沿纵向的滑移, 也就必然会导致内力的耗散。因此, 从安全角度考虑, 本项目在计算过程中分量 F_1 (或 F_2) 均考虑由一组柱间支撑承担而不是三组(相应的地震作用、吊车纵向刹车力按照相同方法执行)。

3.2 风荷载计算

查《荷载规范》得当地 50 年重现期的基本风压 $w_0 = 0.45 \text{ kN/m}^2$; 风压变化系数 $\mu_z = 1.00$ (地面粗糙度类别为 B 类); 在风荷载系数 μ_w 按照上述两种方法取值时, 将各计算参数分别代入式(1)、(2)中, 计算结果如表 3 所示。

表 3 风荷载计算值

计算依据	类别	h/m	μ_w/m	F/kN	F_1/kN
式(1)	经验取值	9.95	0.790	99.14	24.79
	理论取值	9.95	0.756	94.87	23.72
式(2)	经验取值	9.95	0.790	118.97	29.74
	理论取值	9.95	0.756	113.85	28.46

由表 3 计算数据显示, 系数 μ_w 按照经验取值取值(0.79), 最终计算得到的柱间支撑风荷载计算值 F_1 与理论计算值相差不大, 且更偏于保守一点, 与本文第二章节中结论一致。此外, 考虑《通用规范》的风荷载放大系数, 会显著的增加柱间支撑风荷载计算值。

4 结 论

(1) 门刚结构主刚架风荷载计算时, 应当在现行《门刚规范》中的风荷载计算公式的基础上, 考虑风荷载脉动系数的增大效应来修正计算。

(下转第 89 页)

裂缝形态及大小判定该类裂缝为剪切裂缝,主要是因为上部荷载增加致使应力加大,同时由于压溃柱发生受压破坏,进而导致梁在支座处所承受的剪应力变大所致。

(2) 压溃柱的顶板覆土超过设计覆土,并且在挖掘机的自重作用下导致柱所承受的轴力急剧增大,间接性导致存在严重质量缺陷的构件在自身承载力不足的情况下超载工作,从而加剧了破坏的发生。

4.2 建议

根据《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)的相关规定,同时结合现场检测情况提出处理建议如下。

(1) 应立即清空顶板现有覆土,减轻顶板荷载,对受损构件加固施工完成后再根据结构实际承载力确定覆土高度或选用其他方式进行覆盖。

(2) 应对混凝土存在严重离析的部分采用比原标号高一等级的混凝土进行置换处理,然后采用外包型钢或增大截面法对柱进行加固处理;对存在蜂窝较为严重的构件应剔除外层骨料并清除灰浆,然后采用混凝土浇筑封闭,再贯入水泥砂浆封闭缝隙形成整体。

(3) 对存在裂缝且不影响构件承载力的可采用表面封闭法、注射法或注浆法进行修补,对于裂缝较大影响承载力的构件可采用粘钢法或粘贴

碳纤维进行处理。

(4) 应对未覆土部分的混凝土构件进行全面检测,对发现存在混凝土质量缺陷的构件应根据其缺陷程度及时采取相关措施进行处理。

(5) 应由具有相关资质的单位根据现场情况并结合检测数据制定可实施的加固处理方案。

5 结 语

在混凝土浇筑过程中,应避免施工冷缝交接处由于模板之间拼接不到位,导致浆液外流大量水泥浆聚集,出现离析现象;梁柱节点浇筑施工前应加强对节点处钢筋均匀分布的监督检查,避免浇筑时骨料不能均匀地分散至各处,同时进行振捣施工时应确保振捣棒能穿过钢筋层实现振捣到位,避免出现骨料分布不均匀、不密实现象出现。本文结合现场检测和不同工况下的承载力计算分析,确定了事故发生的主要原因,为后续加固处理及出现类似事故提供了重要依据和施工借鉴。

参考文献:

- [1] 肖珍,刘方亮,邹玄. 某地下室结构检测鉴定与分析[J]. 建筑安全,2020,35(10):28-31.
- [2] 史永恒. 某地下车库混凝土框架柱施工质量事故分析[J]. 混凝土与水泥制品,2019(4):92-96.

(上接第75页)

(2) 针对封闭式双坡屋面轻型门刚结构,柱间支撑风荷载计算过程中,系数 μ_w 的经验取值(0.79)与理论计算取值,对最终的计算结果影响不大,经验取值略偏为保守,在实际设计过程中可按照经验取值设计。

参考文献:

- [1] 陶林惠,何琼芳,尹谦钧. 大型燃煤电厂超长钢结构主厂房结构创新设计研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2021,54(增刊2):103-109.
- [2] 司徒俊. 钢结构的各结构类型对比[J]. 工程建设,2017,49(4):13-15;24.

- [3] 张正鹏,王成生,田砾. 风荷载脉动对门刚梁、柱应力比影响的案例分析[J]. 工程建设,2023,55(6):12-17.
- [4] 相震东,吴耀华. 低层轻型房屋围护面板的风荷载计算[J]. 钢结构(中英文),2019,34(6):83-88.
- [5] 袁中亚,李方慧,张特,等. 龙卷风作用下高低屋面风荷载特性研究[J]. 工程建设,2023,55(7):1-6;18.
- [6] 张利军,邹安宇. 门式刚架结构风荷载放大系数需要连乘吗?[J]. 钢结构(中英文),2022,37(6):53-55.
- [7] 门式刚架轻型房屋钢结构技术规范:GB 51022—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [8] 汪一骏. 新钢结构设计手册[M]. 北京:中国计划出版社,2018.