

Analysis of Stability Influencing Factors of Glass Rib Supported Glass Curtain Wall

Shigao Hu Shubin Zhang Lintao Wei Yanyan Mao

China Construction Decoration Green Innovation Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430065, China

Abstract

In order to investigate the factors related to the stability of glass ribs, this paper uses Sap2000 software to analyze the effects of panel segmentation, self weight effect, and support method on rib stability. The results show that the panel segmentation has a great influence on rib stability, and the more the smaller the flexion factor of the ribs. The weight effect is beneficial to the stability of hanging glass ribs and to the stability of sitting and vertical glass. The glass rib buckling factor supported by three sides is much higher than the stability of the glass rib supported on both sides, and the difference is about 10 times. These conclusions provide some theoretical basis for the design of glass rib supported glass curtain wall.

Keywords

panel segmentation; panel dead weight; support mode; buckling factor

玻璃肋支撑式玻璃幕墙稳定性影响因素分析

胡世高 张书斌 魏林涛 毛炎炎

中建装饰绿创科技有限公司, 中国 · 湖北 武汉 430065

摘 要

为了研究玻璃肋稳定性和哪些因素有关, 论文运用Sap2000软件分析面板分段、自重效应、支撑方式对肋稳定性的影响。结果表明, 面板分段对肋稳定性影响较大, 面板分段越多, 肋的屈曲因子越小。自重效应对吊挂式玻璃肋的稳定性有利, 对坐立式玻璃的稳定性不利。三边支撑的玻璃肋屈曲因子远远高于两边支撑的玻璃肋稳定性, 两者屈曲因子相差10倍左右。这些结论为玻璃肋支撑式玻璃幕墙的设计提供一些理论依据。

关键词

面板分段; 面板自重; 支撑方式; 屈曲因子

1 引言

玻璃肋支撑式玻璃幕墙是面板与支承框架均为玻璃的一种全透明、全视野幕墙。由于玻璃是一种脆性材料, 玻璃肋作为幕墙的支撑结构, 其截面一般比较宽和薄, 在肋跨度较大时肋的稳定性是必须考虑的问题。关于玻璃肋支撑式玻璃幕墙的强度计算、设计要点规范讲解^[1]和研究较多^[2-6], 但对肋的稳定性方面研究较少, 许芳^[6]对大跨度全玻璃幕墙稳定性进行了分析。贺玉珍^[7]对大跨度点式玻璃肋的稳定性计算和节点设计进行了研究^[1]。

2 玻璃肋侧向整体稳定性理论计算

玻璃肋作为幕墙的支撑结构, 因其截面的特殊性, 玻璃肋平面内的刚度远远大于平面外的刚度。在承受风荷载和其他外界荷载时玻璃肋可能会发生平面外的弯曲和扭转, 即

面外的失稳。因玻璃幕墙规范对玻璃肋平面外失稳没有提供明确的计算方法, 现参考上海建筑玻璃幕墙规范^[8], 将玻璃肋简化为三边简支板进行计算, 具体计算公式如下:

$$M_{cr} = \frac{(\frac{\pi}{L_{y0}})^2 (EI)_y (\frac{W^2}{4} + y_0^2) + (GJ)}{(2y_0 + y_k)} \quad (1)$$

其中, M_{cr} 为侧向屈曲弯矩 (N·mm); L 为玻璃肋的高度 (mm); E 为玻璃弹性模量; I 为玻璃肋弱轴方向惯性矩 (mm⁴); W 为玻璃肋宽度 (mm); y_0 为侧向约束与中性轴之间距离 (mm); G 为玻璃剪切模量; J 为玻璃肋的抗扭惯性矩 (mm⁴); y_k 为荷载作用点与中性轴之间距离 (mm)^[2]。

通过对公式 (1) 分析发现, 玻璃肋的极限侧向屈曲弯矩主要与玻璃肋的高度、截面尺寸有关。但此公式存在以下 3 方面的不足: ①无法体现肋或者面板自重对稳定性的影响。②无法体现肋支撑方式 (坐立或吊挂) 对稳定性的影响。③当玻璃面板分段布置时, 对玻璃肋的侧向支撑作用将大大减弱, 此公式无法反映减弱作用^[3]。

【作者简介】胡世高 (1987-), 男, 中国湖北武汉人, 硕士, 高级工程师, 从事玻璃幕墙结构研究。

3 玻璃肋整体稳定性 SAP2000 有限元分析

针对理论计算公式无法计算的情况，我们一般采用有限元计算，论文采用 SAP2000 软件中的特征值（线性）屈曲分析对玻璃肋进行稳定性分析。

特征值屈曲分析^[9,10]：理想状况下结构失稳时的荷载称为屈曲荷载。就是利用结构的刚度矩阵减去荷载作用下结构应力刚度矩阵乘以一个系数，这个系数称之为屈曲因子，计算公式如下：

$$([K]-\lambda [S])\cdot\{\psi\}=0 \tag{2}$$

其中，K 为原始刚度矩阵；[S] 为外界荷载产生应力刚度矩阵；{ψ} 为位移特征矢量；λ 为特征值即屈曲因子。

从公式（2）可知自重引起的刚度矩阵可以加强或者减弱结构的整体刚度，这取决于自重产生的应力是拉应力还是压应力。对吊挂式玻璃肋而言，自重产生的拉应力加强了结构的刚度。对坐立式玻璃肋而言，自重产生的压应力减弱了结构的刚度。于是考虑自重效应后，计算公式如下：

$$([K+K(G)]-\lambda [S])\cdot\{\psi\}=0 \tag{3}$$

式中：K(G)——自重引起刚度矩阵变化量；

[K+K(G)]——结构承受自重之后的刚度。

4 玻璃面板分段对玻璃肋稳定性的影响

公式（1）玻璃肋的稳定性计算，认为玻璃面板作为一整块，能够为玻璃肋提供很好的侧向支撑，玻璃肋简化为 3 边支撑的面板计算，随着玻璃肋高度不断增大，玻璃面板由于造价等因素控制通常会被分段，此时玻璃面板对玻璃肋的支撑作用减弱，本章通过具体算例分析面板分段对玻璃肋整体稳定性的影响。分别计算面板整块、2 段、3 段、4 段时玻璃肋的稳定性。计算边界条件统一处理如下：玻璃肋吊挂，上下两边约束，面板和面板、面板和肋之间结构胶不传递弯矩，连接按照铰接处理^[4]。

算例 1：某玻璃肋支撑玻璃幕墙工程，面板为 10+1.52SGP+10mm 钢化夹胶玻璃，肋为 15+1.52SGP+15+1.52SGP+15 钢化夹胶玻璃，肋水平线荷载标准值 $W_k=1.80\text{kN/m}$ ，玻璃肋宽度 $W=400\text{mm}$ ，高度 $L=10\text{m}$ 。分析面板分段对玻璃肋整体稳定性的影响。

通过对表 1 数据分析得到：

①面板为一整块的情况下，玻璃肋屈曲因子为 44.25，和三边支撑肋屈曲因子 44.94 基本一样。所以玻璃面板一整块的情况下，计算玻璃肋稳定性时可以近似等效为三边支撑的简支板^[5]。

②当面板分成四段时，屈曲因子为 10.71，但还是大于两边简支玻璃肋屈曲因子 4.32，所以面板分段对玻璃肋仍然有一定的侧向支撑作用，但支撑作用较弱。

表 1 面板分段情况下玻璃肋屈曲因子

肋受力形式	面板分段情况	屈曲因子
肋吊挂，带面板	整块	44.22
	2 段	12.33
	3 段	12.15
	4 段	10.71
肋吊挂，三边支撑	无面板	44.94
肋吊挂，两边支撑	无面板	4.32

5 玻璃肋幕墙受力形式简化分类

当面板分段不考虑对肋的侧向支撑，面板整块对肋提供稳定侧向支撑作用时，玻璃肋的受力形式可以分为以下四种形式。

受力形式 1：肋吊挂，面板整块吊挂。此种形式为传统意义上的全玻璃幕墙。玻璃肋只承担面板的水平荷载，玻璃肋按照 3 边简支受拉板考虑。

受力形式 2：肋吊挂，面板分段坐落在玻璃肋上。玻璃肋既承担面板的水平荷载又承担面板自重荷载，玻璃肋按照 2 边简支受拉板考虑。

受力形式 3：肋坐立，面板整块坐立。玻璃肋只承担面板的水平荷载，玻璃肋按照 3 边简支受压板考虑。

受力形式 4：肋坐立，面板分段坐落在玻璃肋上。玻璃肋既承担面板的水平荷载又承担面板自重荷载，玻璃肋按照 2 边简支受压板考虑^[6]。

6 不同受力形式玻璃肋稳定性计算分析

下面通过具体算例分析各种受力形式对玻璃肋整体稳定性的影响。计算条件同算例 1，肋的高度分别为 $L=12\text{m}/10\text{m}/8\text{m}/6\text{m}$ 。下面分析不同受力形式下肋跨度、面板自重、面板支撑条件对肋的稳定性影响，得到结果如表 2 所示^[7]。

7 结语

论文运用 SAP 2000 有限元软件对影响玻璃肋稳定性的相关因素进行了分析，得到以下结论：

①面板分段情况下，玻璃肋屈曲因子迅速降低，从 44.22 降到 12.33，降低了近 4 倍，面板分数越多玻璃肋屈曲因子越小，对肋的支撑作用越弱^[8]。

②对吊挂式玻璃肋而言，自重对玻璃肋稳定性有利，屈曲因子变大。对坐立式玻璃肋而言，自重对玻璃肋稳定性不利，屈曲因子变小，所以在实际工程中对于面板分段的肋支撑式幕墙，肋尽量采用吊挂形式，减少肋失稳破碎的风险^[9]。

③不管是吊挂还是坐立式玻璃肋，肋采用三边支撑的屈曲因子远大两边支撑，玻璃肋跨度越大两者差值越大，所以在设计此类幕墙时尽量采取一些构造措施保证肋有可靠的侧向支撑，保证肋的整体稳定性^[10]。

表 2 各种受力情况屈曲因子比较

肋面板受力形式	肋跨度	屈曲因子(无自重影响)	屈曲因子(有自重影响)	自重影响	肋面板受力形式	肋跨度	屈曲因子(无自重影响)	屈曲因子(有自重影响)	自重影响
受力形式 1: 肋吊挂, 面板整块	12m	26.79	26.87	有利	受力形式 3: 肋吊挂, 面板整块	12m	26.79	26.72	不利
	10m	44.94	45.02			10m	44.94	44.85	
	8m	70.31	70.38			8m	70.31	70.23	
	6m	125.17	125.24			6m	125.17	125.11	
受力形式 2: 肋吊挂, 面板分段	12m	1.91	2.37	有利	受力形式 4: 肋吊挂, 面板分段	12m	1.91	1.61	不利
	10m	4.33	4.95			10m	4.32	3.65	
	8m	8.16	8.78			8m	8.16	7.81	
	6m	18.47	19.09			6m	18.47	18.16	

参考文献

[1] JGJ102—2003 玻璃幕墙工程技术规范[S].

[2] 胡世高.爆炸荷载作用下全玻璃幕墙动力放大因子求解[J].广东土木与建筑,2017(3):24-25.

[3] 陶照堂,惠存,李永春,等.超高坐地式玻璃肋幕墙系统结构性能和位移能力试验研究[J].建筑结构,2018(22):112-115.

[4] 陆凯.全玻璃幕墙在幕墙设计施工中的运用[J].上海建材, 2019(3):33-36.

[5] 李滇,王超,梁云东,等.一种折线形全玻璃幕墙的设计方法[J].建筑科学,2021(1):36-41.

[6] 许芳.大跨度全玻璃幕墙稳定性分析[J].建筑技术开发,2017(21): 27-28.

[7] 贺玉珍.大跨度点式玻璃肋的稳定性计算分析和节点设计[J].建筑技术开发,2017(1):154-155.

[8] DG/TJ08-56—2019建筑幕墙工程技术标准[S].

[9] 方志庆,李长春,干梦军.大跨度门式干煤棚网壳结构整体稳定性能分析[J].电力勘测设计,2021(9):36-40.

[10] 孙训芳,方孝淑,关来泰,等.材料力学[Z].