

互为支撑的全玻幕墙设计简析

黄 杰

同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司 上海 200092

摘 要: 本文简要介绍了安吉某工程主要幕墙系统的方案比选,并对初步确定的互为支撑的全玻幕墙系统方案通过有限元设计软件进行初步的设计计算分析,并由公式计算的方法验证软件计算的可行性。通过计算结果,为工程设计提供相应的计算数据支撑。

关键词: 有限元软件;互为支撑的全玻幕墙;

大型公共建筑单体有别于常规建筑,通常层高巨大,室内视野更广,建筑师更希望能有通透、极简的效果。互为支撑的全玻幕墙由于没有遮挡视线的横竖框,也更受到建筑师的青睐,但下坐式互为支撑的超大玻璃由于面板厚度较薄,其结构稳定也是一个重要的问题,受限于相关规范不完善还应用较少。本文通过对工程该类型系统的初步设计及计算分析验证体系的可行性,支撑后续工程施工图设计,并为该类型幕墙体系设计提供参考。

1 工程简介

本工程位于浙江省安吉市,依山傍水,建筑整体空间布局遵循水-山-溪-远山的轴线序列,依次由东向西展开,中轴两侧突出彰显标志性。建筑形体设计源于当地特有的竹文化,体现出竹叶灵动轻盈的形态,将原本超大大体量的空间打散重组,体现出建筑屋檐层叠错落,鲜活灵动的感觉。平面布置上,大堂大部分区域为折线拟合的弧度造型,为配合整体效果,建筑师希望立面幕墙能体现的更通透,尽量减少遮挡。

建筑立面外表皮上部结构边界较为复杂,分别有对应主体混凝土结构及不同的叶片钢结构。由于叶片需表达轻盈的形态,限制其钢结构高度构造空间,立面幕墙不能按常规上挂式幕墙设计,只能选用下坐式设计方案。

2 方案比选

为实现立面效果,进行了多种方案比选,包括常规下坐式无横梁框架幕墙、下坐式超大玻璃肋幕墙以及下坐式互为支撑的超大全玻幕墙。

下坐式无横梁框架幕墙:钢立柱下端铰接,承受面板传递的水平荷载及竖向荷载,上端采用轴向释放的铰接,仅承受面板传递的水平荷载,玻璃采用分段形式,自重通过隐藏在胶缝中的托板直接传递给立柱,玻璃面板按两侧对边支撑设计。该方案无横梁,仅有横向胶

缝,但竖向立柱较大,在折线幕墙范围侧向视野会有很明显的视觉遮挡,通透性差,立柱也会占用较大室内空间,但整体造价较低。

下坐式超大玻璃肋幕墙:玻璃肋下端铰接,承受面板传递的水平荷载及玻璃肋自身竖向荷载,上端采用轴向释放的铰接,受力形式与下坐式无横梁框架幕墙的立柱一致,但面玻不分段,玻璃肋不承受面玻重力,由面玻直接通过转接件传递至下方主体结构梁。由于玻璃肋侧向刚度较弱,折线幕墙两侧受荷大小及方向均不一致,玻璃肋有可能弱轴承受最不利的水平荷载组合,需要增加肋的厚度,会增加成本。该方案玻璃肋也会占用较多室内空间,但通透性较第一种方案好。

互为支撑的超大全玻幕墙:面玻不分段,下端通过特殊转接件实现与主体结构梁铰接,上端亦通过转接件与主体结构铰接,竖向释放,各相邻面玻之间缝隙通过结构胶填充,充分利用面板平面内刚度相互抵抗相邻面板受到的垂直面板方向的水平荷载。该方案相较常规幕墙无立柱,不占用室内空间,且面板为整块不分段,效果通透,但造价略高。

本工程综合效果及造价等方面考虑,初步方案选定采用互为支撑的超大全玻幕墙系统。

3 设计难点

立面幕墙上方大部分为钢结构,层间位移较大,幕墙需采用合适的构造消化其带来的位移影响。另外立面幕墙上方既有主体混凝土结构又有叶片钢结构,且各叶片本身结构极度不规则,各自会产生较大的相对位移;立面幕墙上方支点会跨越不同边界条件,需处理好该处幕墙相邻面板之间吸收主体结构相应的位移;面板之间相互支撑受力,应考虑防倒塌;由于单个板块面积大,导致其自重非常大,设计时还需主体结构综合考虑施工通道及相应施工荷载等。

本文主要针对上述第一个难点进行初步设计及计算分析。

4 设计及计算分析

4.1 基本信息及构造设计

幕墙平面为尺寸为约1000mm和约2400mm交替布置的锯齿状，面板之间填充约30mm宽硅酮结构密封胶，整体平面呈弧形，截取计算单元的平面如图1，竖向高度随屋面造型变化，最大高度约20m，最小高度约3m，为减小超大玻璃加工难度，所有玻璃面板均为矩形，通过Rhino模型，叶片钢结构在与玻璃干涉面做避让处理。

玻璃面板上下均连接在特制钢槽内，面玻与钢槽间填充垫片及密封胶，当面玻出现平面外倾斜时，通过垫片及密封胶的收缩消化平面外角度变形，另外钢槽自身有较大刚度，能有效传递面板所受荷载，并保证玻璃均匀受力，下部构造节点示意图如图1。面板下部钢槽中间通过特殊转接件连接至预埋件，其连接能保证钢槽将承受面玻的水平及侧向力传递至主体结构，且转接件的可转动构造使玻璃面板能适应主体结构的层间位移变形其他因素导致的玻璃面板平面内倾斜。面板上部钢槽中间连接转接件增加竖向长条孔构造，保证其能有效传递面玻所受的水平荷载但不传递竖向荷载，在面板破坏失去承载力的极端情况时，长条孔下端限位承受部分重力荷载，避免出现面板倒塌的情况。通过上述的构造措施，保证互为支撑的全玻璃幕墙体系构造成立，系统横、竖剖示意图见图2。

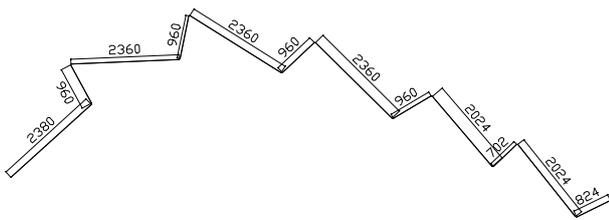


图1 计算单元平面尺寸示意图

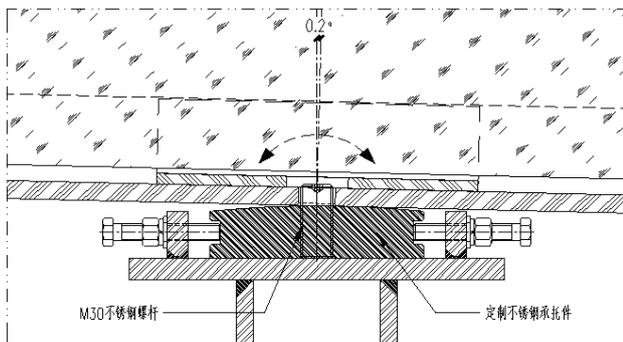


图2 标准节点图

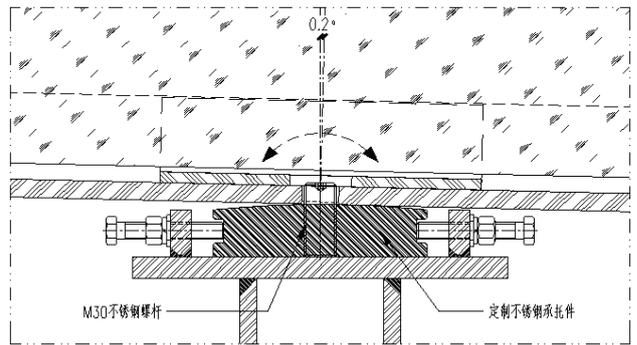


图3 玻璃底部角度旋转示意图

4.2 材料特性

分析和设计中所采用的基本构件的材料属性如下：

玻璃弹性模量：72000Mpa

玻璃泊松比：0.2

12mm钢化玻璃强度设计值：84Mpa

12mm钢化玻璃强度设计值：67Mpa（边缘强度）

结构胶弹性模量：1.4Mpa（厂家提供）

结构胶短期荷载作用下强度设计值：0.2 MPa

结构胶泊松比：0.49（厂家提供）

4.3 软件计算计算

4.3.1 玻璃面板信息

计算玻璃最大宽度：B1 = 2400mm

最小宽度：B1 = 730mm

玻璃最大高度范围：H1 = (15-20m)

玻璃配置：12TP+ (1.52SGP+12TP) *5+16A+12TP+1.52SGP+12TP钢化双银Low-E夹胶中空玻璃

4.3.2 有限元软件计算

选取部分区段在软件sap2000内建模如图4，按计算所得的强度荷载组合加载，并计算得到系统的玻璃面板应力如图5，得到玻璃面板之间结构胶应力如图6

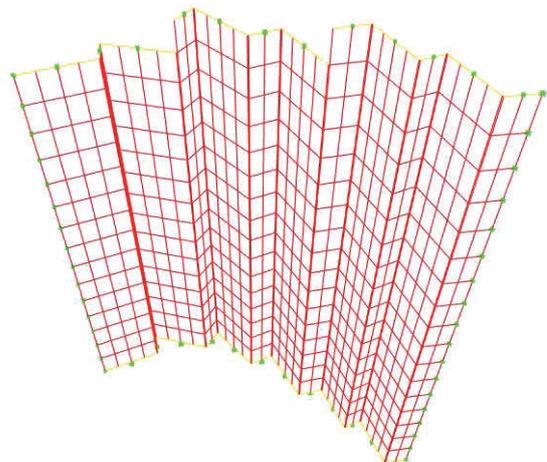


图4 计算模型简图

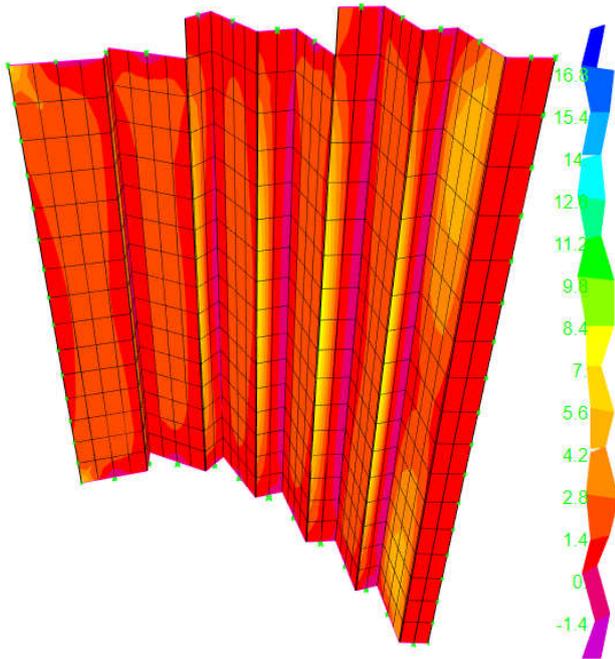


图5 一阶弹性分析面板最大应力18.1MPa

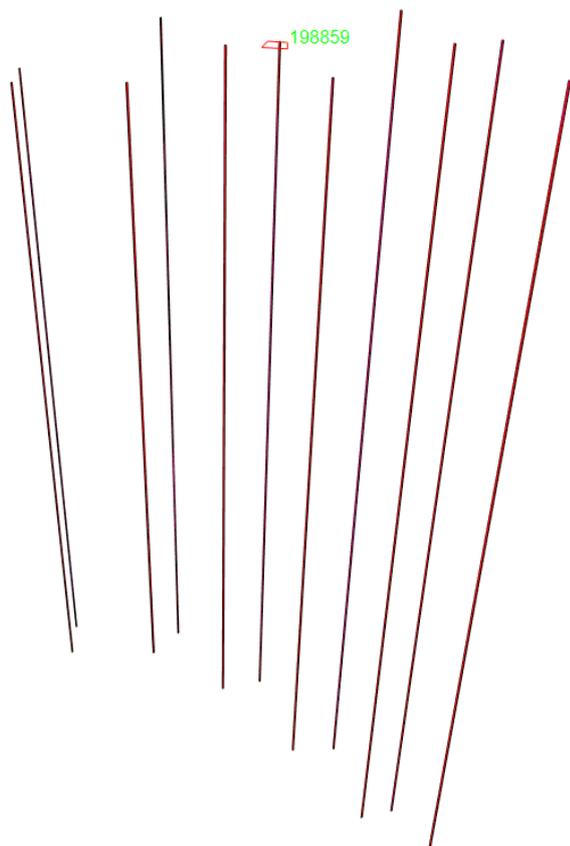


图6 一阶弹性分析结构胶最大应力0.199Mpa

下坐式全玻璃幕墙系统为压弯的受力形式，此处根据规范要求按二阶P-Δ弹性分析法设计，考虑P-Δ效应、几何初始缺陷及大变形效应。由于互为支撑的面板面内的

刚度很大，会约束相邻面板的面外变形，实际面板为四边支撑的受力形式，会减小其由于初始缺陷的影响。参照相关的技术标准，主体结构层间位移角按钢结构最小1/250，全玻璃幕墙初始缺陷为1/240，此处为简化计算，初始缺陷也按顶部位移荷载加载，考虑位移荷载，与风荷载设计组合叠加后验算面板应力，面板计算的应力图见图7。

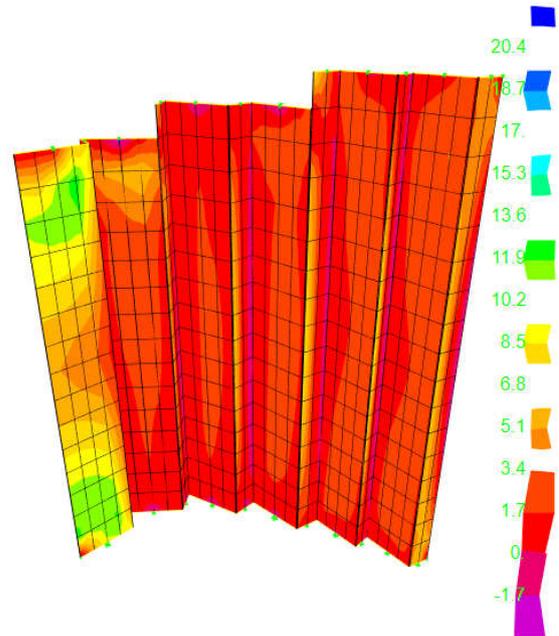


图7 二阶弹性分析面板最大应力22.0MPa

4.4 公式验算

通过有限元软件的初步分析计算可知，互为支撑的超大全玻璃幕墙系统基本可行，以下参照相关标准按照压弯构件通过对其进行稳定性分析验算。为简化计算，面板轴力按全部8片12mm钢化玻璃，刚度按外层6片SGP夹胶的12mm钢化玻璃，等效厚度72mm计算。

- A_{tot} ——玻璃面板的玻璃截面总面积 (mm^2)
- f_g ——玻璃边缘强度设计值 (N/mm^2)
- N_k ——截面轴力标准值 (kN)
- N_1 ——截面轴力设计值 (kN)
- N'_{cr} ——玻璃面板受压时的弹性屈曲临界荷载 (kN)
- k_1 ——玻璃面板受压时的稳定系数
- t_{eff} ——面板玻璃的计算刚度等效厚度 (mm)
- t_e ——面板玻璃总厚度 (mm)
- b ——受压矩形面板宽度 (mm)
- h ——受压矩形面板高度 (m)
- ν ——玻璃材料的泊松比
- D ——玻璃刚度 ($kN.m^2$)
- ρ_g ——玻璃重度 ($kN.m^{-3}$)

$$D = \frac{Et_{eff}^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{72000 \times 72^3}{12 \times (1-0.2^2)}$$

$$= 2332.8kN.m^2$$

临界屈曲荷载

$$N'_{cr} = k_1 \frac{\pi^2 D}{b^2} = 4 \frac{3.14^2 \times 2332.8}{2.4^2}$$

$$= 15973kN$$

轴力标准值

$$N_k = \rho_g t_e b h = 25.6 \times 96 \times 2400 \times 20000 \times 10^{-9} = 118.0kN$$

轴力设计值

$$N_1 = 1.3 \times N_k = 1.3 \times 118 = 153.4kN$$

安全系数

$$k = \frac{N'_{cr}}{N_1} = \frac{2332.8}{153.4} = 15.2$$

4.5 结构胶验算

玻璃上端与主体钢结构相连，水平约束，钢结构水平位移时，对应板块上支点均随其一起水平移动，将其运动方向分解为垂直面板和平行面板方向，垂直面板方向位移由前述钢槽与面板之间的垫块及密封胶消化，平行面板方向位移时，相邻板块间会产生相对错动位移，面板之间的结构胶需消化掉该位移，可以根据几何公式计算相邻面板的结构胶相对位移。

b——玻璃面板宽度

θ ——主体结构的楼层弹性层间位移角限值 (rad)

u_s ——相邻玻璃之间的相对位移 (mm)

t_e ——柜台结构密封胶的粘结厚度 (mm)

δ ——硅酮结构密封胶的变位承受能力

$$u_s = b \cdot \theta = \frac{2400}{250} = 9.6mm$$

$$t_e \geq \frac{u_s}{3\delta} = \frac{9.6}{3 \times 0.125} = 25.6mm$$

结构胶实际厚度 $t_e = 30mm$ ，满足设计要求。

5 结论

本文简要介绍了通过特殊的节点构造措施，解决了为支撑的超大全玻璃幕墙适应主体结构变形及防倒塌等问题，另通过有限元及公式方法初步验证了互为支撑超大全玻璃幕墙结构可行性。针对实际工程还需深入研究边界条件不一致、变形不协调等问题对幕墙系统的影响。

参考文献

- [1]建筑结构荷载规范:GB50009—2012.北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [2]钢结构设计标准:GB50017-2017.北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [3]建筑幕墙工程技术标准:DG/TJ 08-56-2019.上海:同济大学出版社,2020.
- [4]《钢结构稳定设计指南》[M].陈绍藩:中国建筑工业出版社.2004.