

拉索幕墙边界条件影响分析

黄 杰

同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司 上海 200092

摘 要: 本文简要介绍了上海某工程入口拉索幕墙方案比选及分析,在确定拉索方案后,通过有限元设计软件对拉索幕墙单独建模及带主体钢结构整体建模分析,比较不同边界条件两者的计算差异,通过计算结果,为本工程设计提供有利的数据支撑,也为之后类似工程提供参考。

关键词: 有限元计算分析;拉索幕墙

建筑的主入口大堂是展现建筑物特点的一个重要窗口,也是建筑外观设计的重要组成部分,该建筑为某集团总部项目,建筑师希望展现出开放、通透、大气的效果。最终,主入口立面采用点式拉索幕墙形式,由于入口带两侧转角,且角部主体结构柱为内退布置,无法布置横向索,故采用竖向单向索的布置形式,角部单索在高度方向上从后方结构柱设置三道悬臂梁作水平支撑。本文通过对工程该类型系统的初步设计及不同边界模型建模分析,验证不同边界条件对计算分析的影响,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

本工程位于上海市,为办公建筑,建筑总高度60m,入口大堂高度约22m,宽16.5m,入口钢架宽12.5m,挑出雨蓬约3.5m。

2 方案比选

为实现方案效果,进行了几种方案比选,主要为入口门框钢结构与拉索连接形式的比选,包括拉索下端直接连接至入口门框钢结构的方案一以及拉索下端穿越入口门框钢结构连接至首层主体结构梁的方案二。

方案一优点:该区段拉索长度减小,所需预应力会相应减小,减少对主体结构的影响。方案一缺点:拉索下端连接至入口门框钢结构,可能会有连接端外露,影响视觉效果;需对入口门框钢结构进行加强设计,并在对应拉索下端增加钢柱连接,满足其受力要求。

方案二优点:该区段拉索穿越入口门框钢结构,不会对钢结构传递额外荷载,可减小入口门框钢结构设计难度。方案二缺点:由于拉索变形较大,拉索在穿越门架钢结构顶端处需预留较大水平伸缩距离消化其不同步变形;另外拉索与入口门框钢结构变形不一致,交接处玻璃角部连接需吸收对应位移,致使连接处防水及位移吸收设计均较困难;门式刚架内的拉索穿越段仍需对拉索做防护措施。

本工程综合造价、与主体结构间交叉施工难度等多方面考虑,采用拉索下端直接连接至入口门框钢结构的方案设计。

3 设计方法选择

单层索网幕墙根据索结构的支座模拟方式,一般有固定支座法、协同分析法和等效弹簧支座法^[4]。

固定支座法是在分析时,对索结构采用隔离模型,将支承条件直接处理为刚性连接的方法。其计算模型缺点:在计算精度上会有一定损失;优点:1)力学模型简单,传力途径清晰,大大减少结构计算规模,2)更容易对研究对象进行针对性分析。

协同分析法为索支撑结构与主体结构整体建模的分析方法。其计算模型缺点:计算量较大;优点:是索结构支承边界模拟方法中最完善、最精确的分析方法。

等效弹簧支座法也是采用隔离模型,但将主体结构的变形作用影响用等效刚度的弹簧进行模拟替代的方法。其计算精度及模型模型计算量介于前两者之间。

本文对拉索上端边界条件按前两种方法,即固定支座法(刚性边界)和协同分析法(实际钢结构框架边界)两种形式进行有限元计算分析,比较其差异,为后续施工深化设计提供数据支撑。

4 设计及计算分析

4.1 基本信息及构造设计

入口立面水平长度16.5m,高18.9m,该系统拉索为竖向单向索,共八根,拉索标准水平间距2.5m,两侧拉索间距2m。拉索上方与主体钢结构框架梁连接,中间六根拉索长度约14.4m,下方与主体入口门框钢结构连接,拉索与入口门框钢结构的钢柱均一一对应,可使拉索轴力直接通过钢柱传递给主体混凝土结构梁。两侧拉索长度约18.9m,下端连接至首层主体结构梁的预埋件,且两侧拉索在跨中设置三道水平支撑,水平支撑杆件为幕墙范围,根部连接至主体结构柱。标

准玻璃面板尺寸为2.5m（宽）x1.4m(高)，玻璃配置为8+1.52SGP+8+12Ar+8+1.52SGP+8的双夹胶中空玻璃，标准位置玻璃面板四点支撑。

标准节点处面板通过不锈钢夹具连接至拉索。转角节点处面板也通过专用不锈钢角部夹具连接至拉索，但沿高度方向每三个分格处夹具额外通过转接件与从主体结构伸出的水平悬臂梁连接，该节点水平约束，竖向释放。拉索顶、底通过配套的锁头、销轴及耳板等连接至主体结构。计算模型中拉索承受的风荷载及自重荷载均按实际集中荷载施加。

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^[2]：

钢材弹性模量：206000MPa

钢材牌号：Q355B

钢材抗拉强度设计值：295MPa

钢材抗剪强度设计值：170MPa

不锈钢拉索弹性模量：130000MPa

不锈钢拉索直径：38mm

不锈钢拉索断面积：837.10mm²

不锈钢拉索最小破断力：1082.87KN

悬臂钢方管规格：100×200×10mm

4.3 软件计算计算

4.3.1 荷载组合

恒载S1：

此幕墙玻璃总厚度32mm，玻璃的自重为32×25.6 = 819.2Pa，考虑配件及框料重量，此部分玻璃幕墙自重按900Pa。

风荷载S2：

计算标高为20米

地面粗糙度为C类

根据《建筑结构荷载规范》GB50009—2012，《建筑幕墙工程技术规范》DGJ08-56-2012^[1]

风荷载标准值： $W_k = \beta_{gz} \times \mu_{s1} \times \mu_{z2} \times W_0 = 1.99 \times 1.6 \times 0.74 \times 0.55 = 1.29kPa$ （已和动力效应风荷载值比较取大）

地震荷载S3：

幕墙设计地震荷载根据《建筑抗震设计规范》GB50011-2010及《玻璃幕墙工程技术规范》JGJ102-2003有关非结构的规定来采用,垂直于幕墙平面的水平地震作用标准值计算如下：

垂直于幕墙平面水平地震荷载： $q_{ek} = \alpha_{max} \beta_E G_K = 5 \times 0.08 G_K = 360Pa$

其中：

β_E --动力放大系数， $\beta_E = 5.0$ ；

α_{max} --地震影响系数最大值， $\alpha_{max} = 0.08$ ；

G_K --构件的面重力。

由于幕墙自重较小，经比较风荷载为主控荷载，后续组合忽略地震荷载

温度荷载S4：

升降温±40℃

预应力S5：

拉索预应力约250kN

4.3.2 固定支座法（模型一）计算

按不包含主体钢框架结构在软件sap2000内建模，拉索上端均为铰支座，中间六根拉索下端与主体入口门框钢结构相连，两侧拉索下端为铰支座，且两侧拉索跨中增加三道水平支撑梁，梁根部刚接，模型如图1。

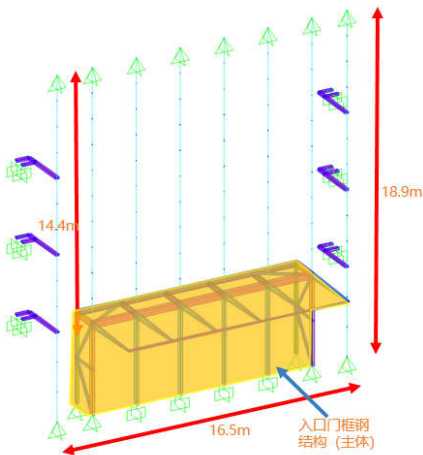


图1 拉索系统计算模型简图

该方案加载拉索预应变 $\epsilon_0 = -2.3 \times 10^{-4}$ ，对应预应力约245-250KN（由于索长不一样及入口门框钢结构影响），预应力轴力图如图2。

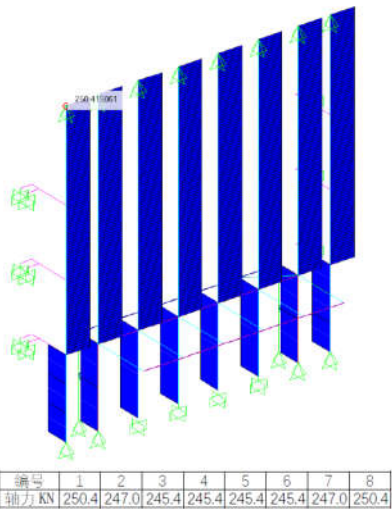


图2 拉索预应力工况最大轴力图

经计算正常使用极限状态组合拉索最大变形如图3，对应荷载组合工况为1.0S1（恒载）+1.0S5（预应力）+1.0S2（风荷载）+0.6S4（温度荷载）。承载能力极限状态组合拉索最大轴力如图4，对应荷载组合工况为1.0×1.3S1（恒载）+1.0×1.3S5（预应力）+1.0×1.5S2（风荷载）+0.6×1.5S4（温度荷载）。

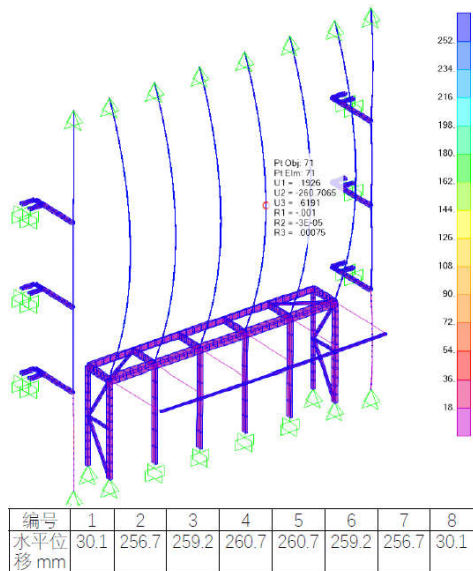


图3 最不利正常使用极限状态组合拉索最大变形图

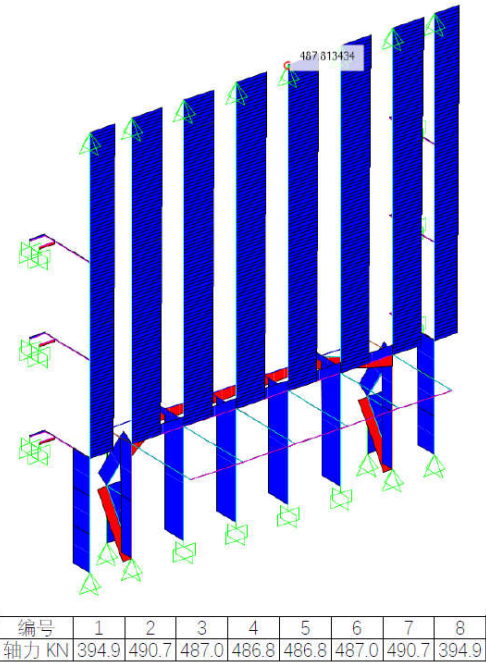


图4 最不利承载能力极限状态组合拉索最大轴力图

4.3.3 协同分析法（模型二）计算

将主入口上方主体结网框架结构及对应柱、梁等构件在软件sap2000内建模，拉索上端与主体框架梁相连，中间六根拉索下端与主体入口门框钢结构相连，两侧拉

索下端为铰支座，且两侧拉索跨中增加三道水平支撑梁，梁根部与主体框架柱相连，模型如图5。

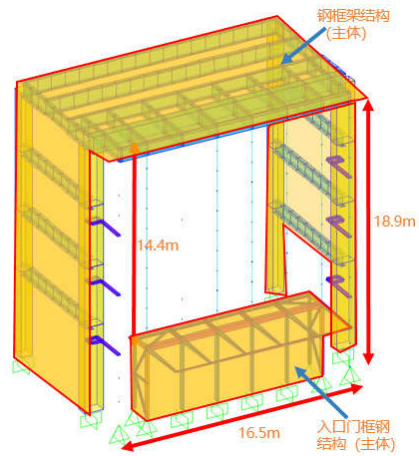


图5 拉索系统计算模型简图

拉索加载目标预应力250KN，将预应力工况反力提资给主体结构，由主体结构提供拉索顶端主体结构框架梁竖向位移，得到各拉索的变位差值，拉索会出现相应的预应力损失。根据该位移差值与对应拉索长度，简化计算各拉索需增加的补偿预应变 ϵ_1 。预加载拉索预应变 $\epsilon_0 = -2.3 \times 10^{-4}$ 及各拉索的补偿预应变 ϵ_1 如表1。

表1 拉索补偿预应变

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
预应力下主体位移 (mm)	4.78	12.61	19.60	23.44	23.44	19.60	12.61	4.78
补偿预应变 $\epsilon_1 \times 10^{-3}$	0.253	0.876	1.361	1.628	1.628	1.361	0.876	0.253

拉索对应预应力约250KN，预应力轴力图如图6。

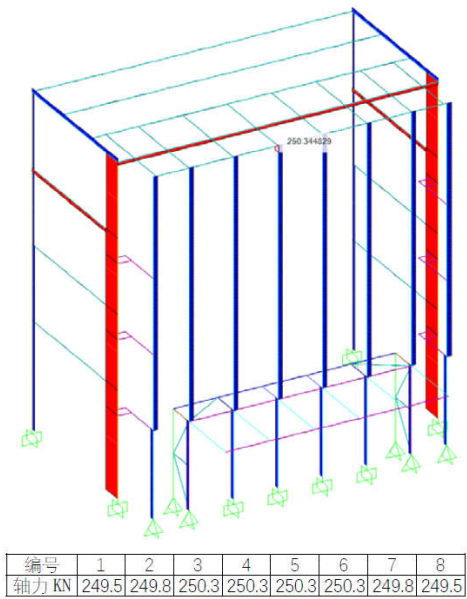


图6 拉索预应力工况最大轴力图

经计算正常使用极限状态组合拉索最大变形如图7，对应荷载组合工况为1.0S1（恒载）+1.0S5（预应力）+1.0S2（风荷载）+0.6S4（温度荷载）。承载能力极限状态组合拉索最大轴力如图8，对应荷载组合工况为1.0×1.3S1（恒载）+1.0×1.3S5（预应力）+1.0×1.5S2（风荷载）+0.6×1.5S4（温度荷载）。

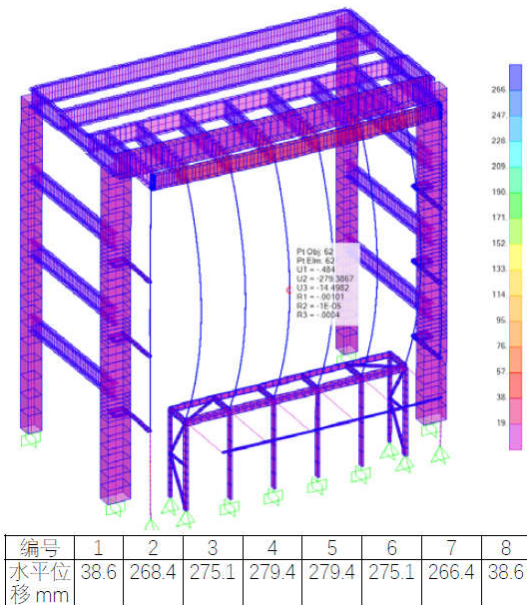


图7 最不利正常使用极限状态组合拉索最大变形图

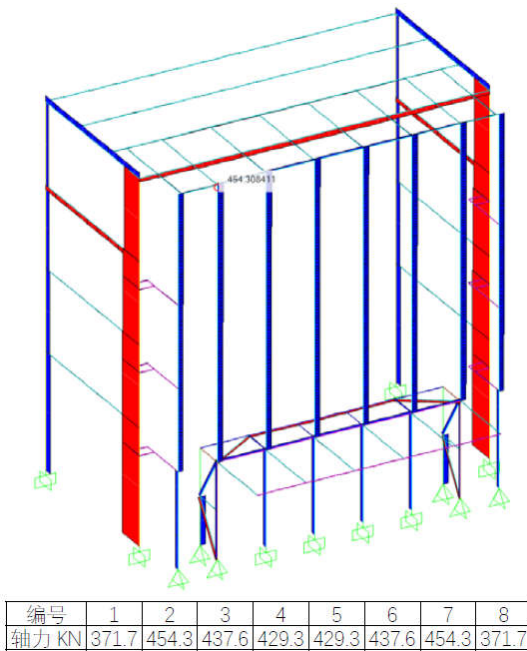


图8 最不利承载能力极限状态组合拉索最大轴力图

4.4 计算分析

通过固定支座法（模型一）及协同分析法（模型二）的计算结果，可发现在预应力基本相同的情况下，模型一在标准组合工况下拉索变形值更小，极限承载能力组合工况下拉索轴力更大。

经分析由于方案一的刚性支座，在上述工况组合中，支点均无变形，拉索不会出现由支座位移导致的预应力损失，使其较真实边界条件计算的拉索轴力偏大，相应的拉索变形偏小。

本工程选用的两种不同计算方法均满足设计要求。

5 结论

本文简要介绍了对比拉索不同边界条件（拉索顶端按刚性边界和拉索顶端按实际钢结构框架边界）两种形式，分别按固定支座法和协同分析法计算分析比较，发现其边界条件不同会对计算结果有影响。主要表现为刚性边界计算拉索轴力偏大，变形偏小。

主体结构边界为混凝土结构或刚度大的其他结构时，可采用固定支座法计算，其计算误差较小，精度可控，也可在该方法基础上根据不同工况主体结构变形导致的预应力损失带入分析，以提高拉索幕墙计算精度。

当拉索系统及边界条件较复杂时，建议针对实际工程，协同分析法或等效弹簧支座法，尽量减小应上述因素造成的设计偏差。针对实际工程还需进一步研究边界条件不一致、施工工况、防连续倒塌、主体结构变形计支座不均匀沉降等问题对拉索幕墙系统的影响^[3]。

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]《索结构玻璃幕墙研究及应用》刘军进：中国建筑工业出版社，2024.