

施工过程对上海中心幕墙支撑结构的影响分析

何志军, 李久鹏, 丁洁民

(同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 通过对上海中心大厦幕墙支撑结构和主体结构的施工模拟分析,研究了幕墙支撑结构的变形预调值,并对主体结构变形引起的支撑结构附加内力进行了详细分析.研究表明,采用传统逐层找平的施工方法,施工完成后环梁与设计标高仍存在较大偏差,采用吊点预抬高和吊杆长度调整的措施对环梁标高进行预调整可保证幕墙的几何形态和安全使用;巨柱区间压缩量会引起幕墙支撑结构与主体结构楼面发生数值较大且分布规律复杂的竖向位移差,需通过施工模拟方法对幕墙支撑结构与主体结构间的滑动节点在主体压缩下的滑动行程进行确定,同时巨柱压缩也会引起径向支撑较大的附加弯矩,最大附加弯矩应力比达到0.3,其对幕墙支撑结构安全的影响不容忽视.

关键词: 上海中心大厦; 悬挂式幕墙支撑结构; 施工过程模拟; 变形预调; 收缩徐变

中图分类号: TU 318

文献标志码: A

Analysis on Effect of Construction on Curtain Wall Support Structure of Shanghai Tower

HE Zhijun, LI Jiupeng, DING Jiemin

(Tongji Architectural Design (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the construction simulation analysis of Shanghai Tower, the preset deformation of suspend curtain wall support structure (CWSS) was studied, and additional internal forces in CWSS caused by the compression of super column were analyzed in detail. The analysis results shown that if the traditional methods of construction, that is, the ring beam is calibrated level by level, is used, the elevation of ring beam will be off the correct level after construction is completed. If the pre-raising of suspension point and pre-adjustment of the length of sag rod is adopted, the curtain wall service and geometry can be ensured. The compression of super column can lead to a relative displacement, which is large and complicated, between ring beams and floors of main

structure. Construction simulation analysis should be conducted to determine the slide range of the sliding joint between CWSS and main structure under the compression of main structure. And the additional moment of radial strut caused by compression of super column is equivalent to 30% capacity of moment of radial strut. Its adverse effects on the CWSS cannot be ignored.

Key words: Shanghai Tower; suspension curtain wall support structure; construction simulation analysis; preset deformation; shrinkage and creep

上海中心大厦的外幕墙采用了柔性分区悬挂式幕墙系统,独特的结构系统及其与主体结构的连接关系,导致幕墙结构施工建造力学行为较为复杂.首先幕墙分区悬挂重量大,设备层吊挂支承刚度柔且不均匀,幕墙安装过程中,设备层吊点发生较大的竖向不均匀变形,幕墙环梁因跟随吊点竖向随动变形,导致其外观不平整并影响幕墙板块的安装及使用.因此,非常有必要对幕墙支撑结构进行施工过程模拟分析,并据此采取有效的控制措施确保环梁的几何平整度.此外,巨柱区间高度近60 m,结构整体超高、超重导致区段内巨柱压缩量较大,从而对径向支撑和有节点设计带来不利影响.而主体结构超高、施工周期长,低区幕墙施工完成后,高区主体结构仍在施工,区间巨柱的弹性和非弹性压缩仍将继续发展,为评估幕墙施工完成后巨柱后继压缩变形,需结合主体结构的施工顺序进行施工过程模拟分析,对巨柱压缩量进行计算.

1 施工方案简介

1.1 幕墙支撑结构施工方案

上海中心大厦外幕墙支撑结构采用了由吊杆-

收稿日期: 2015-01-23

基金项目: 上海市科技攻关计划(09dz1207704)

第一作者: 何志军(1972—),男,教授级高级工程师,工学博士,主要研究方向为超高层建筑结构和复杂空间结构等.

E-mail: 8hzj@tjadri.com

通讯作者: 李久鹏(1982—),男,工程师,工学博士,主要研究方向为超高层建筑结构和钢结构等. E-mail: 52ljp@tjadri.com

环梁-径向支撑组成的分区悬挂的柔性幕墙支撑结构系统(图 1). 各区的幕墙支撑系统均悬挂在顶部悬挑的设备层之上, 中部通过径向支撑与楼面相连, 底部通过竖向伸缩节点与休闲层相连, 以允许幕墙与主体结构在竖向可相对自由变形. 支撑结构体系详细介绍参见文献[1].

结合支撑结构的结构布置特点, 幕墙系统采用

如下施工方案, 共由两个阶段组成: ① 幕墙支撑钢结构结构的吊装施工; ② 幕墙板块吊装施工. 幕墙支撑钢结构施工采用由上至下逐层悬挂的方法施工, 由位于顶部的行走小塔吊逐层吊装拼接, 当幕墙支撑结构全部吊装连接完毕后, 再从底层环梁开始由下至上逐层安装幕墙玻璃板块(图 2).

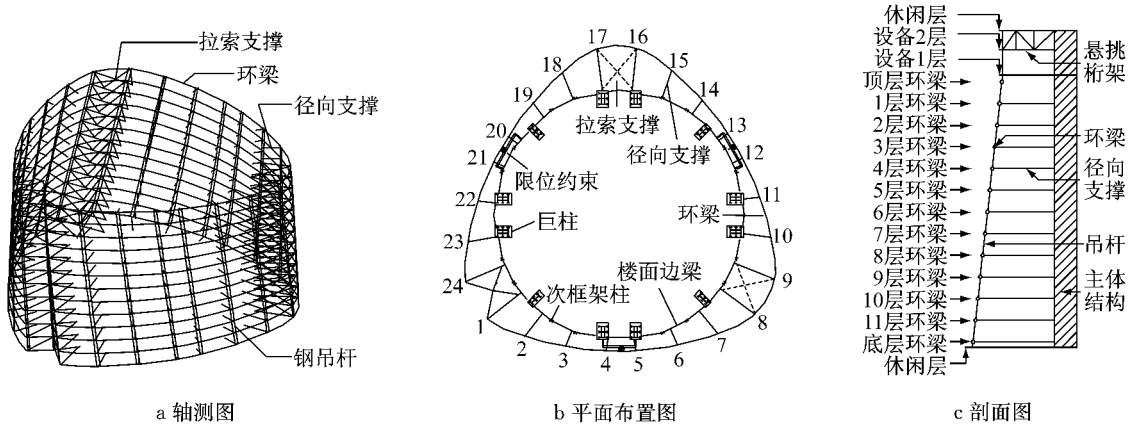
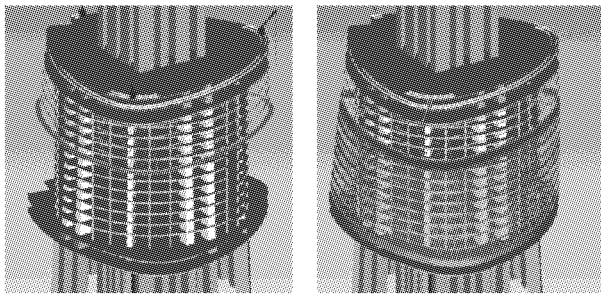


图 1 幕墙支撑结构体系构成及位置编号

Fig.1 Structure system of curtain wall



a 幕墙支撑钢结构吊装 b 幕墙板块吊装

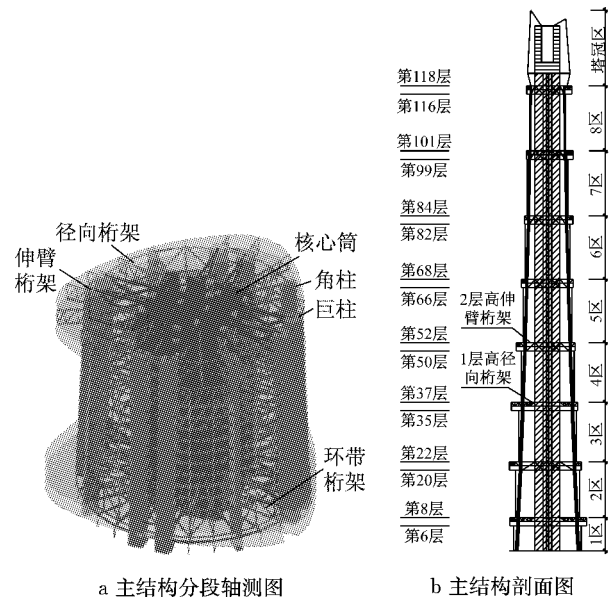
图 2 外幕墙施工顺序示意

Fig.2 Construction sequence of outer curtain wall

1.2 主体结构施工方案

上海中心主体结构采用巨型框架-伸臂-核心筒结构体系(图 3). 其中, 巨型框架结构由 8 根巨型柱、4 根角柱、8 道位于设备层 2 个楼层高的箱形空间环带桁架组成^[1]. 此外, 在各个分区的设备层均设置了外挑径向桁架作为外幕墙结构的重力支承系统. 结合主楼的结构特点施工时采取以下施工方案: ① 地下室施工期间, 核心筒与巨柱同步施工, 楼面结构滞后 1 层施工; ② 地上结构施工期间, 核心筒领先施工; 巨柱钢骨在核心筒施工至 11 层时开始施工, 并且在后续施工阶段滞后于核心筒 9~19 层; 巨柱与楼板混凝土同步浇筑, 滞后于核心筒 12~25 层; 伸

臂桁架按照滞后 1 个区的原则进行合拢; ③ 外幕墙结构在核心筒施工至 65 层(五区)时开始施工; 通过对主楼施工流程及幕墙施工技术可行性的分析, 对幕墙系统按“幕墙支撑钢结构落后主体结构 2 个区施工, 玻璃幕墙落后幕墙支撑钢结构 1 个区施工”的原则, 控制幕墙系统施工的整体立面流程.



a 主体结构分段轴测图 b 主体结构剖面图

图 3 主体结构体系

Fig.3 Main structure system

2 分析模型

2.1 幕墙支撑结构施工过程分析模型

2.1.1 有限元模型及荷载

综合考虑建模和分析的效率,采用 SAP 2000 程序^[2]进行幕墙施工过程模拟。综合考虑计算精度及效率,建立带有幕墙支撑结构的主塔楼区段整体模型(图 4),对幕墙支撑结构进行施工过程模拟,对塔楼的设备层准确建模,以考虑主体结构刚度对幕墙支撑结构的影响。分析时,不考虑楼板的刚度贡献。采用梁单元模拟楼面梁、桁架杆件和幕墙支撑结构构件。采用壳单元模拟剪力墙的墙肢及巨柱^[2]。

支撑钢结构折算重力约为 $0.55 \sim 0.60 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 。典型的幕墙单元以及附属物折算为幕墙单元板块的自重约为 $1.2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

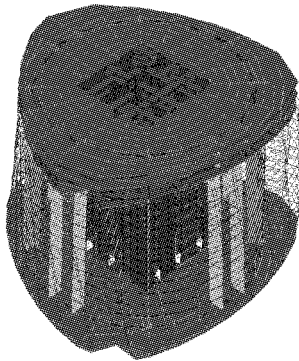


图 4 幕墙支撑结构施工过程分析模型

Fig.4 Analysis model of CWSS construction

2.1.2 施工步划分

模拟采用分步加载的施工过程分析方法,将幕墙的施工过程模拟分为 26 个施工步,假定各层环梁施工时自动找平,模拟开始时仅有塔楼主结构,1~13 施工步为从上至下施工环梁,14~26 施工步为从下至上悬挂幕墙板块。

2.2 主体结构施工过程分析模型

2.2.1 有限元模型及荷载

由于 SAP 2000 无法直接模拟钢筋对混凝土收缩徐变的影响,因此采用 ABAQUS 软件对上海中心的主楼进行施工过程模拟,建立整栋塔楼模型。采用 B31 单元模拟楼面梁、桁架杆件和幕墙支撑结构构件。采用 S4R 单元模拟剪力墙的墙肢和跨高比小于 5 的连梁以及巨柱^[3]。为准确计算混凝土的收缩、徐变,对巨柱及核心筒中的钢骨及钢筋进行了准确模拟。对于钢骨采用建立梁单元与巨柱混凝土壳单元

共用节点方式进行模拟。对于钢筋采用在巨柱、剪力墙的分层壳中建立钢筋层模拟钢筋作用。设备活荷载按 100%考虑,其余活荷载按 40%考虑。由于外幕墙重力较小,其施工过程对巨柱压缩的影响较小,故各区幕墙施工过程简化为吊点荷载一次施加。

2.2.2 施工步划分

采用分步加载的施工过程模拟方法,结合上海中心塔楼的实际施工方案,在施工模拟分析时采用以下施工顺序:将整个施工过程划分为 28 个施工阶段,其中 22 个阶段为主体结构建设阶段,每个阶段施工 4~9 层,用时 50~70 d;其余 6 个阶段为伸臂桁架合拢阶段,模拟时忽略伸臂桁架合拢用时。

2.2.3 收缩徐变参数

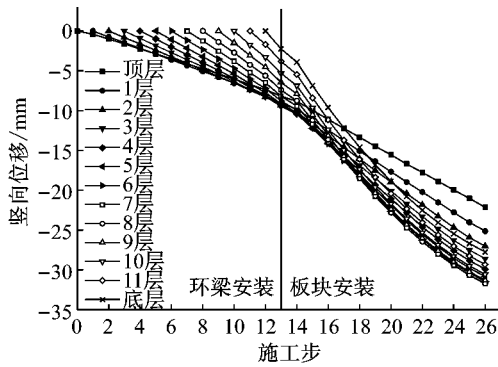
混凝土收缩徐变采用 B3 收缩徐变计算模式,利用 ABAQUS 材料本构接口 UMAT 定义基于 B3 模型^[4]的收缩徐变本构关系用于混凝土收缩徐变分析。混凝土收缩、徐变的主要计算参数如下:环境相对湿度为 70%;加载龄期为 5 d;养护时间为 7 d;水泥类型为快硬高强水泥。

3 施工过程模拟分析与控制

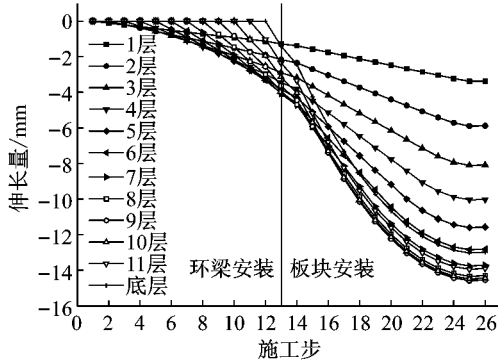
3.1 基于施工过程的环梁竖向位移分析

选取位于角部的悬挑长度较大的 16 号位置(吊点竖向支承刚度小)和凸台位置的悬挑长度较小的 20 号位置(吊点竖向支承刚度大)对环梁的竖向变形特征进行分析,各层 16, 20 号位置在环梁上的位置如图 1 所示。

图 5a 和图 6a 分别为各层环梁在 16, 20 号位置施工过程中的竖向变形情况。从中可以看出:① 随着施工步的增加,竖向位移逐渐增大,16 号点最大竖向位移达到了 31.7 mm, 20 号位置最大竖向位移达到了 14.3 mm。考虑施工过程后幕墙各点的竖向位移仍存在较强的不均匀性。② 同一位置底部环梁位移曲线斜率大于上部楼层环梁位移曲线斜率。这表明下部楼层的竖向位移增加速率相对于上部楼层更快。这是因为某层环梁的总竖向位移等于其顶部吊点刚体位移和其上部各层吊杆伸长量的累加,越位于下部的楼层由于吊杆总长度越长,因此位移增加速率更快。③ 板块安装时,各层环梁位移曲线随着施工步的增加均有增速减慢的趋势,且下部楼层这种趋势发生得更早、更明显。这是因为随着幕墙板块向上逐层安装,产生伸长的吊杆长度逐渐缩短。因此,悬挂板块导致的吊杆伸长增量逐层递减,并且越



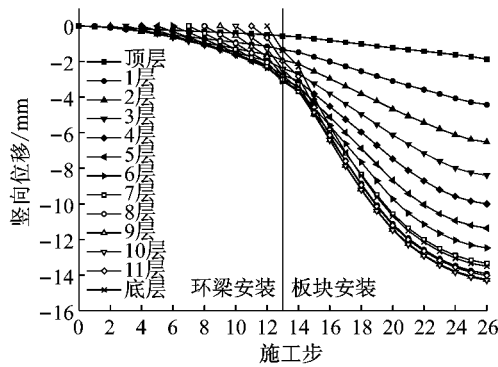
a 竖向总位移



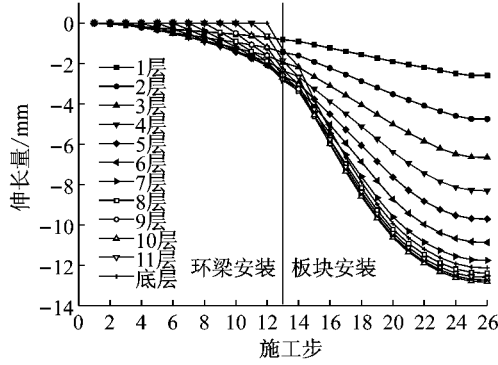
b 吊杆伸长量

图 5 16 号点竖向变形

Fig.5 Vertical total displacement of point 16



a 竖向总位移



b 吊杆伸长量

图 6 20 号点竖向变形

Fig.6 Vertical total displacement of point 20

位于下部的环梁由于板块吊装越早其位移递减效应也出现得更早。

图 5b 和图 6b 分别为 16,20 号位置由吊杆弹性伸长引起的竖向位移对比。由图可知,两个位置吊杆的最大位移量分别为 14.5 mm 及 12.8 mm,两个吊杆伸长量演变的规律基本相同,且各层最大位移量也基本接近。这表明,环梁协调各吊杆变形能力较弱,各组吊杆变形相对独立,仅与其悬挂重力相关。

3.2 变形预调值的确定

图 7 和图 8 分别为模拟分析得到的 16,20 号点的最终变形量。从图中可以看出,若环梁采用逐层找平的传统方法施工,施工完成后,环梁的竖向位移将使幕墙的几何位置偏离设计标高,16 号位置最大偏移值达到 36 mm(8 层环梁),而 20 号位置竖向位移仅为 14 mm,沿环向各点位移值分布极不均匀。因此,需结合模拟分析结果对环梁标高逐层预调整来保证环梁最终平整度。

由图 7 和图 8 可以看出,幕墙环梁的竖向位移

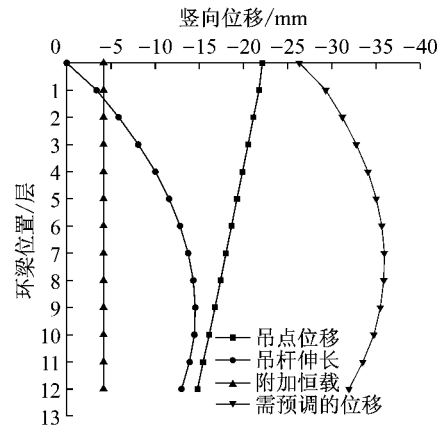


图 7 16 号点预调位移构成

Fig.7 Composition of preset displacement of point 16

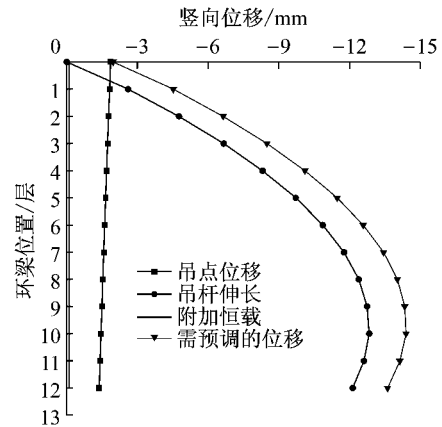


图 8 20 号点预调位移构成

Fig.8 Composition of preset displacement of point 20

主要由幕墙自重引起的吊点位移,设备层附加恒载引起的吊点位移,以及吊杆伸长组成.各个位置吊杆伸长相同,但吊点位移不同,且各个位置变形的主导因素也并不相同,对于悬挑较小位置(20号位置),变形主要由吊杆伸长引起,而对于悬挑较大位置(16号位置),顶部吊点竖向位移和吊杆伸长对环梁竖向位移均有较大影响.基于前述分析,对环梁标高的调整主要从以下两个方面解决:①吊点预抬高,通过调整吊点标高可以调整由于主体结构变形引起的环梁偏离设计标高的问题,并改善环梁平整度;②吊杆长度预调整,通过预调吊杆长度,可以解决由于吊杆自身伸长使环梁偏离设计标高的问题.

各个吊点标高理论调整量如图 9a 所示.由于混凝土材料的特殊性,组合梁效应等因素,混凝土楼板对于设备层的刚度贡献难以准确模拟,因此在计算吊点调整量时未考虑混凝土楼板的刚度贡献,以考虑最不利的变形情况.由于变形计算结果偏于保守,实际操作中,按模拟数值的 60%进行吊点预抬高.每层各个位置吊杆的伸长量基本一致,可统一按图 9b 所示各层吊杆长度的预调整量进行调整.

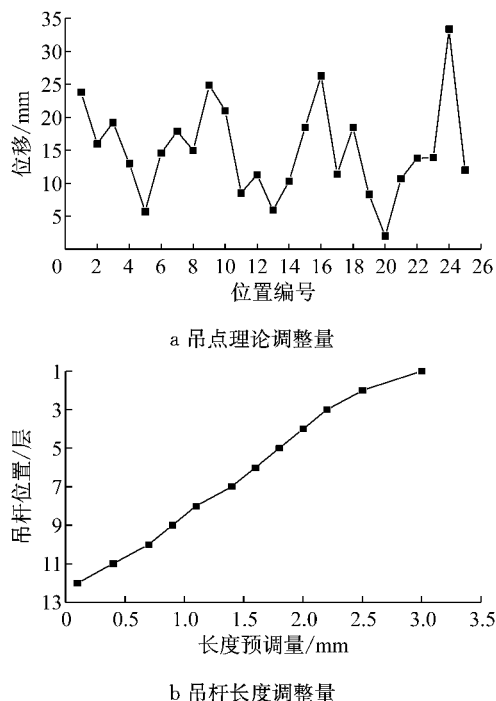


图 9 吊点标高及吊杆长度调整量

Fig.9 Preset displacement of suspension point and preset length of rods in theory

为保证分析结果的合理性,施工中对吊点变形进行了监测.图 10 为各个吊点理论计算与实测值的对比.从图中可以看出,实测结果普遍小于理论计算,约为理论计算位移的 44%~73%,平均为 60%.

且两者分布规律吻合较好.

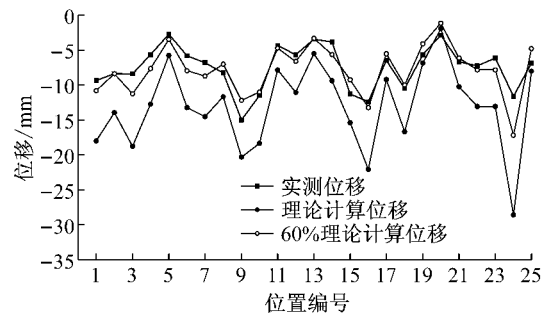


图 10 实测数据与理论数据对比

Fig.10 Actual measured displacement versus theoretical displacement of suspension point

4 主体结构施工对幕墙支撑结构影响

4.1 主体结构区间压缩量分析

图 11 为计算得到的主体结构巨柱总竖向变形.从图中可以看出,在塔楼竣工时,巨柱竖向变形为 80.9 mm,最大竖向变形量发生在 63 层塔楼,竣工 50 年后巨柱竖向变形为 269 mm,塔楼最大竖向变形量发生在 112 层.

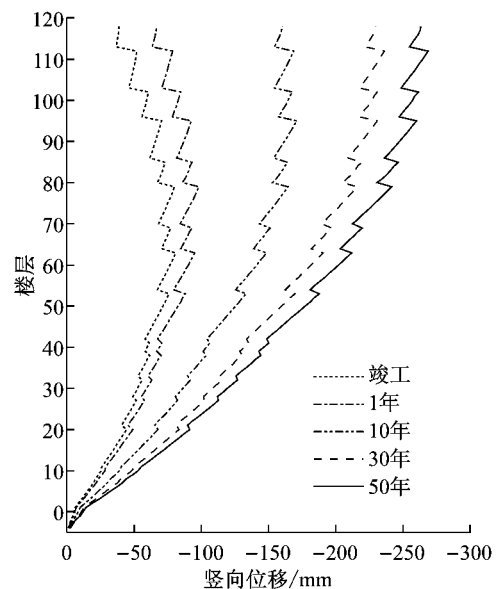


图 11 巨柱竖向变形

Fig.11 Vertical deformation of mega column

根据以上的分析结果,利用各区顶端和低端的竖向变形求得各区巨柱的竖向压缩量,并扣除在幕墙施工前发生的压缩量,可得 50 年后巨柱的区间压缩量,如表 1 所示.

变形成分中,徐变和弹性压缩量高区大低区小,主要是因为弹性和徐变变形均和构件的应力水平呈

表 1 幕墙施工后各区巨柱两端相对变形(50 年)

Tab. 1 Relative deformation of mega column at both ends after curtain wall construction by model

| 区号 | 弹性变形 | 收缩变形 | 徐变变形 | 总变形值 | 设计变形取值/mm |
|----|------|------|------|------|-----------|
| 8 | 0.7 | 15 | 8.4 | 24.1 | 37.9 |
| 7 | 2.3 | 12.7 | 11.9 | 26.9 | 40.8 |
| 6 | 3.7 | 12.2 | 14.8 | 30.7 | 45.5 |
| 5 | 6.1 | 11.7 | 15.6 | 33.4 | 48.3 |
| 4 | 8.2 | 10.4 | 15.8 | 34.4 | 48.5 |
| 3 | 8.9 | 8.9 | 17.7 | 35.5 | 49.4 |
| 2 | 8.9 | 7.3 | 17.1 | 33.3 | 45.9 |

正比,结构下部构件应力水平较上部高,因此构件的弹性和徐变变形量大.收缩则是下部小上部大,主要因为,混凝土构件的收缩变形与构件的体表比呈反比关系,巨柱越向上截面越小,体表比越小,因此构件的收缩变形越向上越大.

由于徐变和收缩变形固有的离散性、模型的误差以及材料性质和环境的随机性,压缩量的计算可能有一定的误差.用于设计时,对分析结果考虑一定变异系数^[4],取收缩变异系数 $\delta_s=0.23$,徐变变异系数 $\delta_{cr}=0.34$,按 95%置信度(50 年)对收缩徐变量按 $1+1.96\delta_s$ 和 $1+1.96\delta_{cr}$ 调整,则竣工 50 年后最终压缩量可确定为表 1 最后一列所示结果,区间最大压缩量达到了 49.4 mm,直接影响相关节点设计^[5-6].

将 ABAQUS 分析的巨柱区间压缩量,以节点强制位移的方式,施加到 SAP 2000 模型中,以分析主体结构区间压缩引起的幕墙支撑结构与楼面的竖向相对位移以及支撑结构附加内力.

4.2 幕墙支撑结构与楼面相对变形分析

下面以 2 区为例对环梁与楼面相对变形规律进行说明,巨柱压缩导致环梁随动变形与对应楼面产生的相对位移(图 12).各个位置径向支撑与楼面间的位移差呈现大小相间的分布规律,最大位移差可达 48 mm 左右,而最小位移差仅为不足 5 mm.图 12 中位移差较大且各层位移差大小基本相同的位置均位于楼面次框架柱附近(图 1),如 3,9,15 等位置,而位移差从高到低呈现渐增规律的位置则位于巨柱附近,如 8,14,20 等位置(图 1).

产生图 12 中所示位移差分布规律的原因是由于楼面边梁在巨柱与楼层次框架柱间铰接,当本区巨柱发生竖向压缩时,次框架钢柱并不会受本区巨柱压缩影响发生竖向缩短,所以,对与次框架连接的环梁,巨柱压缩量即是环梁与楼面相对位移差.而位于巨柱附近的径向支撑其内端支撑点会在巨柱的带动下发生竖向沉降,越位于上部的径向支撑由于巨

柱累计长度较长其竖向位移也就越大,因而与外围的环梁位移差也就越小,巨柱截面在区间相等,各层巨柱压缩量一致,因此位于巨柱附近的径向支撑两端的位移差也就呈现从上到下逐渐递增的规律.

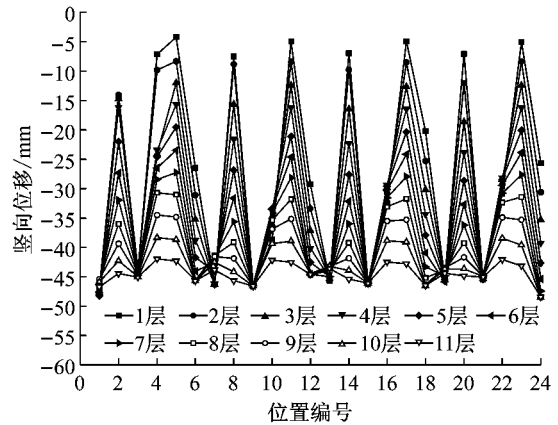


图 12 环梁与主楼相对位移差

Fig. 12 Relative displacement between ring beam and main building

4.3 主体结构竖向压缩对幕墙支撑结构内力影响

常规幕墙结构作为静定的次结构,主体结构变形一般不会引起其次内力,而上海中心幕墙支撑结构作为高度约 60 m 的悬挂结构,环梁与楼面的位移差将在幕墙支撑结构的径向支撑中产生附加内力.

图 13 为 2 区巨柱压缩与幕墙系统自重引起的径向支撑附加弯矩的对比.由图可知,45.9 mm 的巨柱压缩量下径向支撑产生了较大的附加弯矩,附加弯矩最大的位置发生在 3 号位置,支撑长度只有 3 m,抗弯刚度大,最大附加弯矩为 42 kN·m,约为径向支撑抗弯承载力的 30%,远大于不考虑巨柱压缩时幕墙自重作用下径向支撑的附加弯矩 15 kN·m.这表明巨柱压缩引起的各个位置环梁与楼面间不均匀的竖向变形差会显著增加径向支撑的附加弯矩.因此,构件强度设计时考虑巨柱压缩引起的影响是非常有必要的.

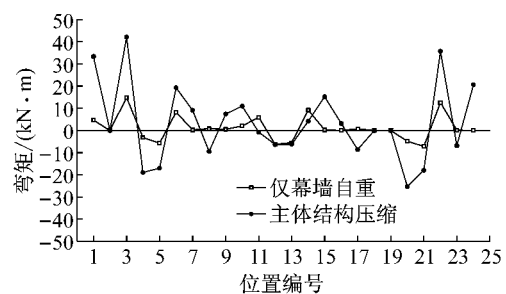


图 13 巨柱压缩引起径向支撑附加弯矩(1 层)

Fig. 13 Radial strut additional moment caused by compression of mega column (level 1)

(下转第 1279 页)