



世博轴阳光谷钢结构设计与研究

汪大绥¹, 方卫¹, 张伟育¹, 丁生根¹, 王荣¹, 高超¹, 张安安²

(1. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002; 2. 上海世博土地控股有限公司, 上海 200125)

摘要:世博轴及地下综合体工程为2010年上海世博会园区标志性建筑之一,其顶棚结构由阳光谷钢结构和索膜结构组成。针对阳光谷体型尺度大、曲面空间复杂、悬挑跨度大、三角形网格组成的单层钢结构体系的特点,结构设计进行了多遇地震作用下的弹性分析、反应谱法罕遇地震作用分析、罕遇地震作用下结构的弹塑性时程分析。分析结果表明,阳光谷结构不仅在各种荷载组合工况下处于弹性工作状态,并且具有较好的抗震性能,达到了大震弹性的抗震能力;结构的控制荷载主要为风荷载;结构传力途径丰富,具有良好的承载能力。

关键词:单层网格结构;弹性分析;弹塑性时程分析;结构设计;抗震性能

中图分类号:TU393.3 TU318 **文献标志码:**A

Design and reseach of Sun Valley steel structure for the Expo Axis project

WANG Dasui¹, FANG Wei¹, ZHANG Weiyu¹, DING Shenggen¹, WANG Rong¹, GAO Chao¹, ZHANG Anan²

(1. East China Architectural Design & Research Institute Co. Ltd, Shanghai 200002, China;

2. Shanghai World Expo Land Holding Co. Ltd, Shanghai 200125, China)

Abstract: The Expo Axis project and its underground multi system is the landmark building of the World Expo Shanghai 2010. Its roofing system is composed of cable-membrane structure and Sun Valley steel structures. Sun Valley is a steel single-layer latticed shell consisting of triangular grid. As to its characteristics with complicated curved surface, huge size and large cantilever span, single layer system etc. The structural design was applied with approaches like elastic analysis under frequently-occurred earthquake, response spectra method under rarely-occurred strong earthquake, and structural elasto-plastic time-history analysis under rarely-occurred strong earthquake as well. Results from all analyses show that structural system of the Sun Valley structure not only works within elastic range under all load combinations but also has good earthquake-resistant performance and all members work elastically under strong earthquake motion. Wind load is the primary design concern among all the loads. The structure presents a good bearing behavior due to all types of loads.

Keywords: single-layer lattice structure; elastic analysis; elastic-plastic time-history analysis; structural design; seismic performance

基金项目:国家科技支撑计划世博科技专项:世博轴及地下综合体关键技术研究(2009BAK43B06),上海市科学技术委员会科研计划项目世博科技专项:世博轴及地下综合体关键技术研究(08dz0580300)。

作者简介:汪大绥(1942—),男,江西乐平人,国家设计大师。E-mail:dasui_wang@ecadi.com

通讯作者:方卫(1970—),女,江苏靖江人,高级工程师。E-mail:wei_fang@ecadi.com

收稿日期:2009年10月

1 工程概况

2010年上海世博会世博轴及地下综合体工程,位于世博会浦东园区,世博轴两侧有中国馆、文化中心、世博中心、主题馆,共同组成了“一轴四馆”的核心园区(图1)。世博轴为浦东世博园区主入口,承担了约23%的客流量入园,是世博会立体交通组织的重要载体。世博轴南北长1045m,东西宽地下99.5~110.5m,地上80m,由地下两层、地面层和高架步道层组成,各层标高分别为-6.5m、-1.0m、4.5m、10.5m,其中-6.5m标高楼层和10.5m标高平台层作为人流入场的主要层面。世博轴在世博会后将发展成为集商业、餐饮、娱乐、交通换乘、会展服务等多功能、特大型的交通商业综合体。

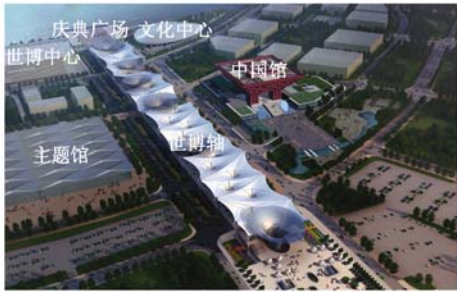


图1 建筑效果图

Fig. 1 Architectural renderings

世博轴顶棚结构包括两个不同类型的结构体系,即6个建筑造型独特的钢结构-玻璃阳光谷和索

膜结构。6个阳光谷(编号依次为SV1~SV6)提供给索膜结构18个支撑点,将两者结合为一体。阳光谷从顶棚贯通至地下二层,为地下空间引入阳光和新鲜空气,同时将雨水收集至地下雨水渠中,实现对雨水的回收利用。

顶棚结构平面图、建筑剖面图见图2、3、4。顶棚方案由德国SBA建筑师事务所及Knippers Helbig结构师事务所共同完成,结构扩初设计由Knippers Helbig结构师事务所与华东建筑设计院共同完成,施工图设计由华东建筑设计院承担。

2 结构体系

阳光谷钢结构采用的是“自由形状”的构形技术。其结构体系是由三角形网格组成的单层空间曲面,类似于单层网壳结构,结构构件以轴向受力为主。三角形网格的构成对于玻璃面内外变形均为有利。

6个阳光谷(SV1~SV6)上下端开口的长轴长度见表1。每个阳光谷的上端均为近似椭圆形的“喇叭口”。标高从-7.00m至35.00m不等,总高度42m。网格体系的形状复杂,悬挑跨度大,由21m至40m不等。图5~8为阳光谷SV1、SV2、SV4、SV6的平、立面图。图9为阳光谷SV1的立面照片,图10为阳光谷SV1的俯视照片。

在钢结构网格内侧面覆盖玻璃,单元形状为三角形,使覆盖的玻璃平面为二维平面形状,同时又保

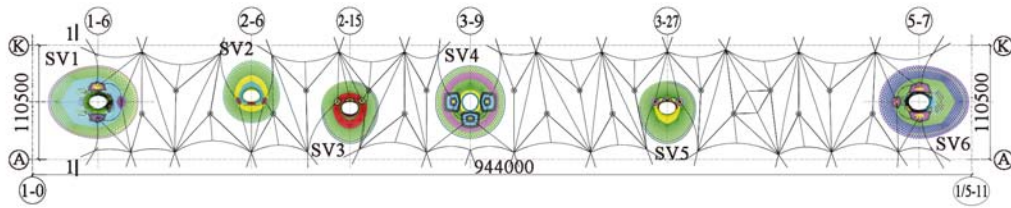


图2 顶棚平面图

Fig. 2 Roof plan

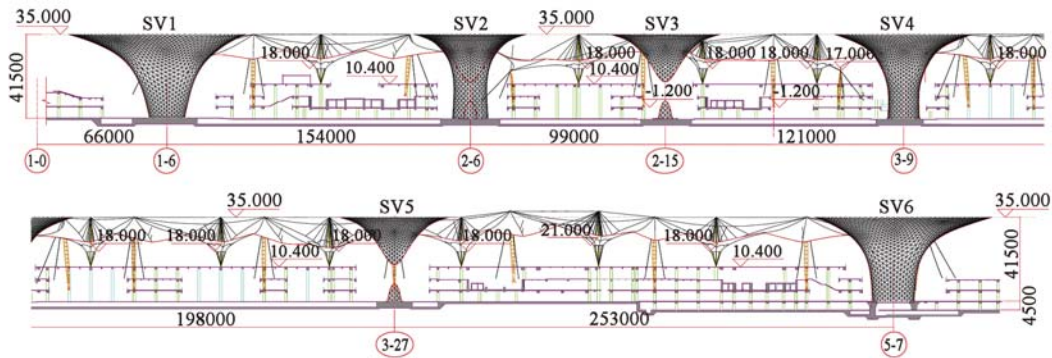


图3 建筑纵剖面图

Fig. 3 Structural longitudinal section diagram

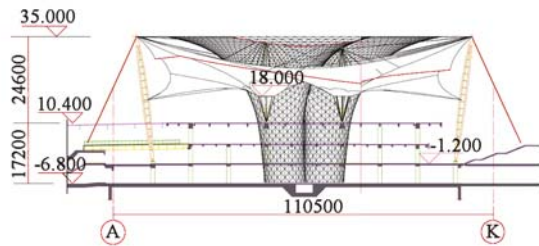


图 4 建筑 1-1 剖面图

Fig. 4 Structural cross-section diagram

表 1 阳光谷 SV1 ~ SV6 结构参数

Table 1 Dimensions of Sun Valley SV1 ~ SV6

阳光谷 编号	长轴/m		短轴/m		结构平 面形式
	上开口	下开口	上开口	下开口	
SV1	90	18	70	12	椭圆
SV2	60	18	57	12	椭圆
SV3	60	18	57	12	椭圆
SV4	70	16	70	16	圆形
SV5	60	18	57	12	椭圆
SV6	90	21	70	15	椭圆

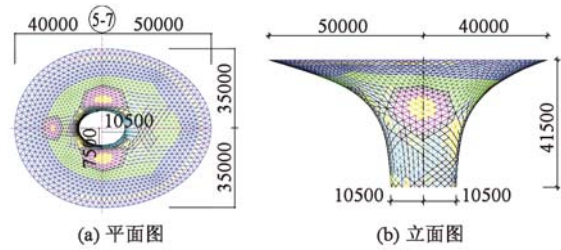


图 8 阳光谷 SV6

Fig. 8 Sun Valley SV6

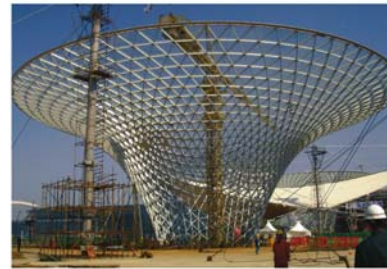


图 9 阳光谷 SV1 立面照片

Fig. 9 Facade photo of Sun Valley SV1

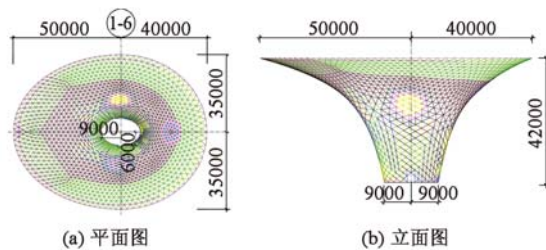


图 5 阳光谷 SV1

Fig. 5 Sun Valley SV1



图 10 阳光谷 SV4 俯视照片

Fig. 10 Overlooking photo of Sun Valley SV4

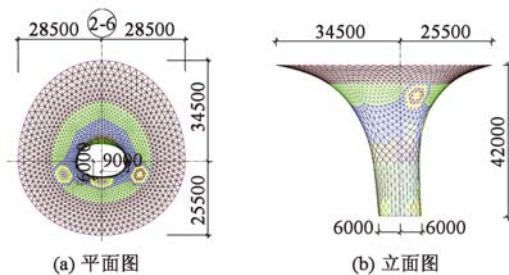


图 6 阳光谷 SV2

Fig. 6 Sun Valley SV2

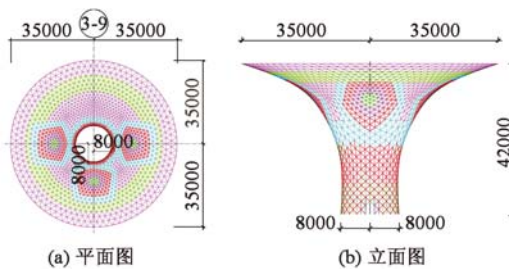


图 7 阳光谷 SV4

Fig. 7 Sun Valley SV4

证了结构在受力后其平面内单元体形状的相对稳定。钢结构杆件大多采用矩形截面的空心焊接钢管,杆件长度 1.50 ~ 3.50m,截面宽度 65 ~ 120mm,截面高度 180 ~ 500mm,大多数截面为 $\square 65 \times 180$,材料为 Q345B 钢。在结构的顶端最外圈,为了加强整个结构的环箍作用,采用了矩形截面的实心杆件;在钢索拉点附近、柱脚节点也采用了实心杆件,材料为 G20Mn5 铸钢。

3 结构设计与分析

3.1 结构模型与建筑模型的关系

由于杆件截面高度 180mm 至 500mm 不等,而覆玻璃幕墙的一面,杆件面必须保持连续和光滑,因此阳光谷的结构模型应为杆件表面中心线模型,而不是传统的杆件轴心中心线模型,所以模型应有一个建筑找形的过程。

建筑模型的具体找形过程是:根据德方 Knippers

Helbig 事务所提供的结构计算模型中 6 根相交杆件轴心中心线的交点,按 6 个面的法线合成矢量方向向外向上平移 90mm,找到杆件表面中心线的交点,并将新的交点相连,形成杆件表面中心线,得到杆件表面中心线的建筑表面模型。

根据建筑表面中心线模型,以及每根杆件的截面高度,确定每根杆件轴线的空间位置;再通过刚性单元将同一节点上处未相交的杆件联结起来,即可得到考虑构件偏心的结构模型。对该模型重新进行计算分析,根据计算结果调整构件截面。

3.2 计算软件和计算模型

阳光谷整体计算分析主要采用 ANSYS 程序,用 SAP2000 程序进行复核。

3.2.1 计算模型基本假定

①阳光谷底部的竖向构件支承于 -7.000m(或 -6.500m)混凝土底板上,沿径向和环向为弹性约束,竖向铰支连接。环向弹簧刚度为 1.0×10^7 kN/m,径向弹簧刚度为 2.5×10^6 kN/m。

②阳光谷杆件为梁单元。

③不考虑阳光谷上覆玻璃幕墙的刚度,仅作为荷载作用于杆件上。

④弹性计算时地震影响系数最大值为 0.08,阻尼比为 0.02。

⑤阳光谷杆件的单杆计算长度 L_0 的取值按 JGJ 61—2003《网壳结构技术规程》^[1],单层网壳杆件的曲面内计算长度为 $1.0L$,曲面外计算长度为 $1.6L$ (L 为杆件长度)。

3.2.2 荷载工况

阳光谷结构整体计算考虑了恒荷载、活荷载、风荷载、温度作用、地震作用等荷载工况,并按规范要求要求进行荷载组合。

恒荷载:包括玻璃荷载、钢结构自重等;

活荷载:取不上人屋面活载及雪荷载两者较大值,并考虑活荷载不均匀分布的影响;

风荷载:风荷载是本工程中的主控荷载,本次设计委托同济大学土木工程防灾国家重点实验室结构风效应研究室,对结构模型进行了风洞试验,通过计算确定风荷载响应。

温度作用:考虑了升温 40℃、降温 20℃ 作用。

地震作用:抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度为 0.1g,特征周期 0.9s,设计地震分组为第一组,场地土类别 IV 类。采用振型分解反应谱法计算地震响应。

3.3 结构弹性计算结果与分析

3.3.1 结构动力特征分析

结构以局部竖向振型为主,结构悬挑边的约束作用较小,相邻区域表现为间隔的上下运动;振型密

集,阳光谷 SV1、SV6 第 1 周期较其它阳光谷的周期长,说明其顶部刚度更弱。以阳光谷 SV1 动力特征分析为例,在第 60 阶前未出现水平振型。表 2 为阳光谷计算模型前 3 阶振型周期,图 11 为阳光谷 SV1 前 4 阶振型图。

表 2 阳光谷计算模型前 3 阶振型周期
Table 2 The first 3-order vibration period of Sun Vallye calculation model

阳光谷编号	T_1 /s	T_2 /s	T_3 /s
SV1	1.172	1.141	1.039
SV2	0.885	0.870	0.806
SV3	0.936	0.882	0.817
SV4	1.043	1.005	0.824
SV5	0.866	0.833	0.806
SV6	1.289	1.264	1.109

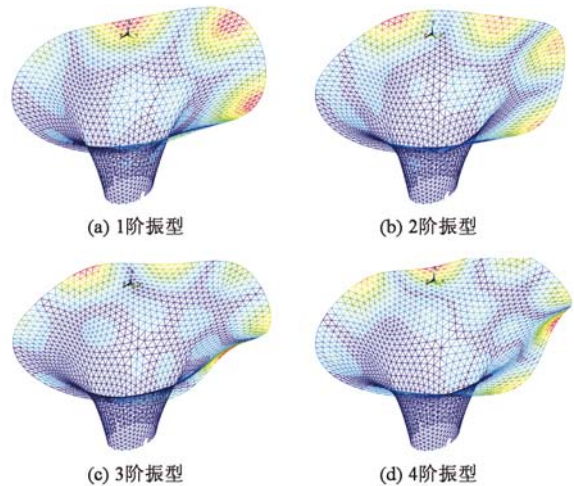


图 11 阳光谷 SV1 前 4 阶振型

Fig. 11 The first 4-order vibration mode diagram of Sun Valley SV1

3.3.2 结构位移分析

表 3 为阳光谷计算模型的位移及位移角包络值,图 12 为阳光谷 SV1 的位移包络云图(其中: X 向为阳光谷长轴方向, Y 向为短轴方向, Z 向为高度方向)。从表中可见,结构悬挑边的 Z 向位移满足悬挑长度的 1/125 控制要求,水平位移满足高度的 1/300 控制要求^[2]。

3.3.3 阳光谷 SV1 内力、应力比分析

(1) 恒荷载作用内力分析

杆件轴力最大值出现在约束较强的阳光谷底部,最大轴拉力 $N_{max} = 485.6$ kN,最大轴压力 $N_{min} = -613.9$ kN。靠近阳光谷底部径向杆件以压力为主,靠近阳光谷顶部环向杆件以拉力为主。杆件强轴(曲面的平面外)索膜支承点处弯矩值较大, $M_{max} = -91.5$ kN·m,其他位置的弯矩在 -12.9 kN·m 和 9.5 kN·m 之间。杆件的弱轴弯矩值、剪力值和扭矩值均较小。图 13 为恒荷载作用下的内力云图。

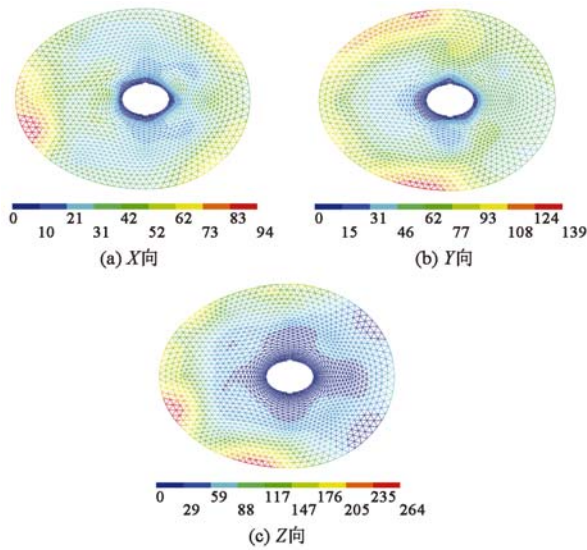


图 12 SV1 的最大组合位移云图(单位:mm)
Fig. 12 Largest combination displacement cloud of Sun Valley SV1

表 3 阳光谷计算模型的位移及位移角包络值

Table 3 Envelope value of displacement and displacement angle of Sun Valley calculation models

阳光谷 编号	X 向		Y 向		Z 向	
	位移 /mm	位移角	位移 /mm	位移角	位移 /mm	位移角
SV1	93.7	1/438	139.1	1/292	-263.9	1/149
SV2	69.7	1/595	-64.6	1/642	-204.7	1/151
SV3	-77.7	1/534	85.7	1/484	-194.2	1/149
SV4	-75.5	1/550	75.4	1/550	-222.0	1/158
SV5	69.7	1/595	-64.6	1/642	-133.1	1/192
SV6	99.2	1/418	117.7	1/353	-306.6	1/127

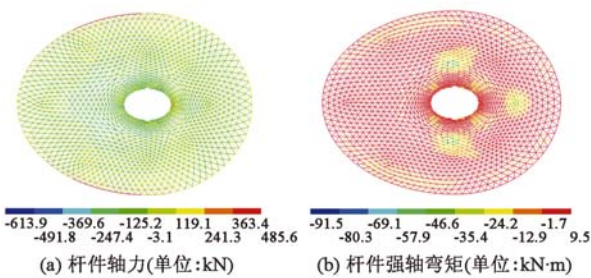


图 13 恒荷载作用下内力云图
Fig. 13 Internal force cloud under dead load

(2) 活荷载作用内力分析

对活荷载进行了最不利组合,最大拉力值出现在顶部二圈的环向杆件上, $N_{max} = 142.3\text{kN}$, 约为恒荷载作用下拉力的 29.2%。最大压力值出现在底部的杆件, $N_{min} = -175.8\text{kN}$, 约为恒荷载作用下压力的 28.6%。图 14 为活荷载作用下轴力云图。

(3) 风荷载作用内力分析

计算模型在风荷载作用下均按会中和会后进行计算分析,阳光谷 SV1 ~ SV5 的风荷载由会中控制、

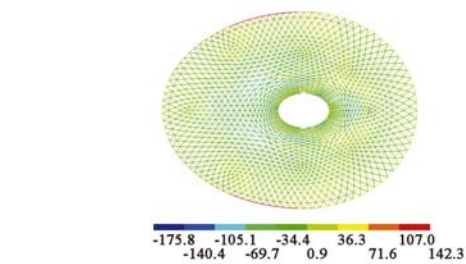


图 14 活荷载作用下轴力云图(单位:kN)
Fig. 14 Axial force cloud under live load

SV6 的风荷载由会后控制(会后在 SV6 前将建造两栋超高层建筑)^[4]。

风荷载作用下内力和位移计算,采用了同济大学风洞实验室提供的风压时程的峰值响应^[4],再与其他荷载工况的计算结果直接进行荷载组合。

风荷载引起的最大轴力值为 315° 风向角下,轴拉力 $N_{max} = 1183\text{kN}$,轴压力 $N_{min} = -1441\text{kN}$,为迎风面或是迎风面两侧的底部竖杆,约为恒荷载作用下的 178% (轴拉力),159% (轴压力)。图 15 为风荷载 (315° 风向角) 作用下轴力云图。

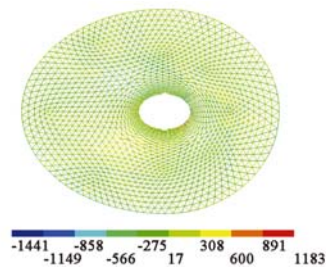


图 15 风荷载(315° 风向角)作用下轴力云图(单位:kN)
Fig. 15 Axial force cloud under 315° direction wind

(4) 温度作用内力分析

温度效应考虑升温 40℃,降温 20℃。杆件轴力最大值出现在约束较强的阳光谷底部,最大轴拉力 $N_{max} = 370\text{kN}$,最大轴压力 $N_{min} = -406\text{kN}$,约为恒荷载作用下最大轴力的 76% (轴拉力)、66% (轴压力)。在约束较弱的阳光谷顶部,杆件轴力都非常小。图 16 为温度作用下轴力云图。

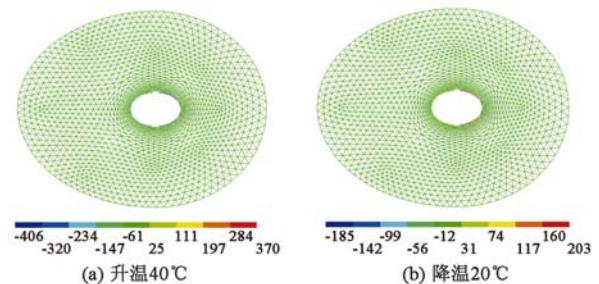


图 16 温度作用下轴力云图(单位:kN)
Fig. 16 Axial force cloud under thermal load

(5) 地震作用内力分析

抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度为

0.1g, 特征周期按上海市工程建设规范 DBJ 08-9—2003《建筑抗震设计规程》^[3]取 0.9s, 设计地震分组为第一组, 建筑场地土类别按 IV 类。地震效应考虑 X、Y、Z 向地震作用。

杆件轴力最大值出现在阳光谷底部, 由 Y 向地震作用引起, $N_{max} = 378\text{kN}$, 约为恒荷载作用下拉力的 77.9%。地震作用引起的杆件轴力相比风荷载作用引起的要小, 大约为风荷载作用引起的 20% ~ 35%。图 17 为地震作用下的轴力云图。

同时, 计算分析表明: X 向剪重比为 5.2%, Y 向剪重比为 4.5%。

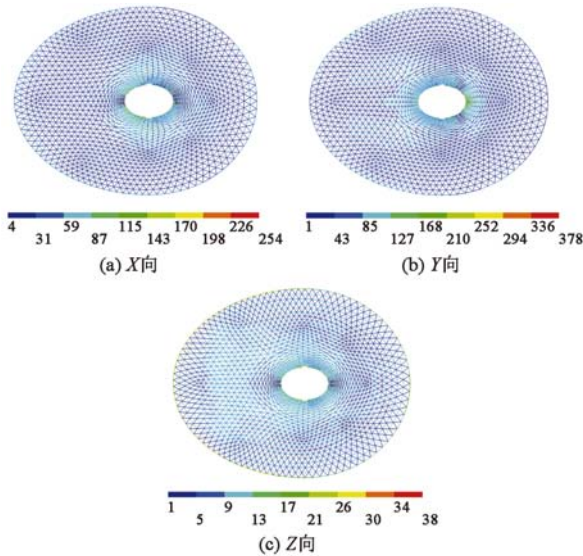


图 17 地震作用下轴力云图(单位:kN)

Fig. 17 Axial force cloud under earthquake action

(6) 最大包络组合的内力分析

阳光谷是由底部向上向外延伸的三角形网格组成的单层钢结构壳体, 杆件的受力以轴力为主, 强轴(曲面的平面外)弯矩主要由索膜拉力引起, 杆件的弱轴弯矩值和扭矩值均较小。图 18 为杆件最大包络组合内力云图。

(7) 阳光谷 SV1 应力比

最大应力比为 0.784, 位于阳光谷底部竖向杆件。图 19 为 SV1 杆件应力比分布云图。

通过上述分析可知, 阳光谷是由底部向上向外延伸的三角形网格组成的单层曲面钢结构, 杆件以受轴力为主。作为膜结构支承点(拉索点)位置附近, 由于结构在平面外承受较大的集中力, 其附近局部构件强轴弯矩较大。恒荷载作用下杆件轴力最大出现在阳光谷底部, 杆件以压力为主, 靠近阳光谷顶部环向杆件以拉力为主。分析表明: 由于结构自重较轻, 迎风面积较大, 风荷载工况下的杆件内力远大于多遇地震作用下的杆件内力。因此, 风荷载作为主要控制荷载工况。

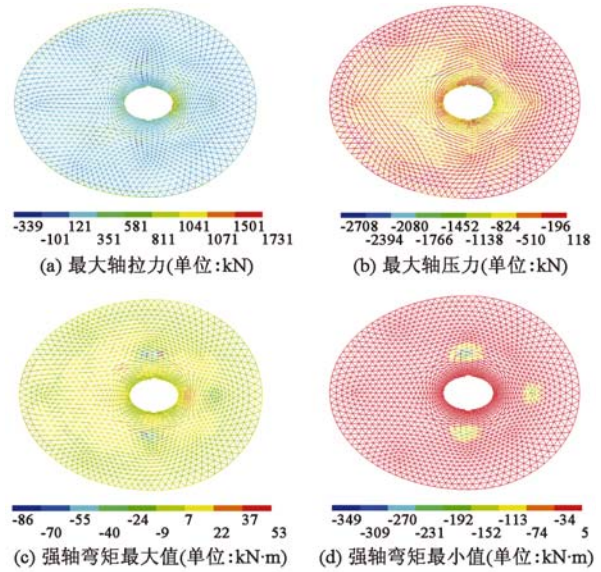


图 18 杆件最大包络组合内力云图

Fig. 18 Largest enveloping combination internal force cloud of bars

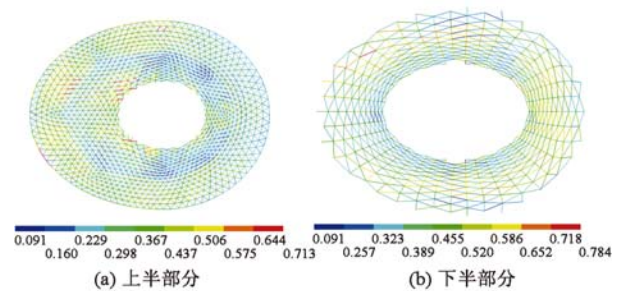


图 19 阳光谷 SV1 杆件应力比分布云图

Fig. 19 Stress ratio cloud of Sun Valley SV1's bars

3.4 罕遇地震作用下地震反应谱方法的受力分析

根据上海市工程建设规范 DBJ 08-9—2003《建筑抗震设计规程》^[3], 罕遇地震时 III、IV 类场地特征周期 $T_g = 1.1\text{s}$; 7 度罕遇地震水平地震影响系数最大值取 0.45, 阻尼比取 0.05。

罕遇地震参与的荷载组合工况下, 阳光谷 SV1 至 SV6 单杆稳定应力未超过钢材强度标准值, 不会发生屈服。原因是结构控制荷载为风荷载。

以阳光谷 SV1 为例, 在多遇地震作用下, X 方向剪重比为 5.2%, Y 方向剪重比为 4.5%; 在罕遇地震作用下 X 向剪重比为 22.7%, Y 向剪重比为 22.3%。

阳光谷 SV1 在罕遇地震作用下的杆件最大应力为 260MPa, 对应的最大应力比为 0.787, 位于底部第一、二圈的竖向杆件。图 20 为阳光谷 SV1 罕遇地震作用下应力及应力比分布云图。

3.5 罕遇地震作用下的弹塑性时程分析

罕遇地震作用下的弹塑性时程分析采用 ANSYS + ABAQUS 软件, 直接将地震波输入计算模型进行弹塑性时程分析, 计算选用一组上海人工波, 7 度罕遇

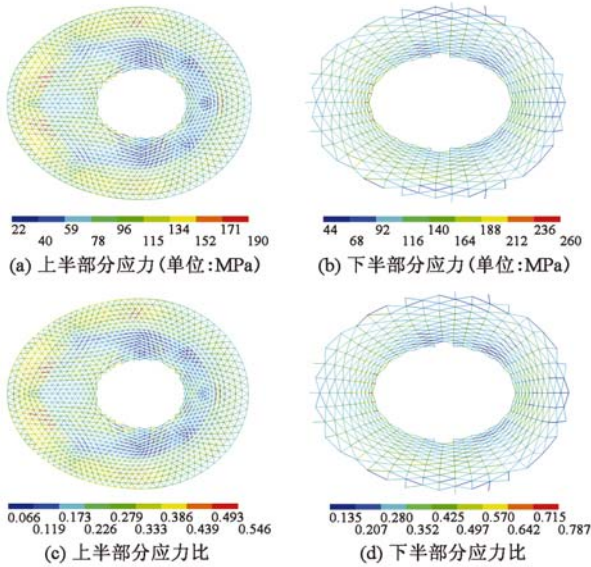


图 20 阳光谷 SV1 罕遇地震作用下应力及应力比分布云图

Fig. 20 Sun Valley SV1's stress and stress ratio cloud under rare earthquake

地震波峰值加速度为 200gal,考虑三向地震作用。

以阳光谷 SV1 为例,可以发现:

- (1) 在罕遇地震作用下,所有杆件均处于弹性状态,达到了大震弹性的抗震能力。
- (2) 杆件最大压应力达到 -217.6MPa (图 21)。
- (3) 阳光谷 SV1 弹塑性水平位移 $1/231$,满足规范 $1/50$ 的要求。

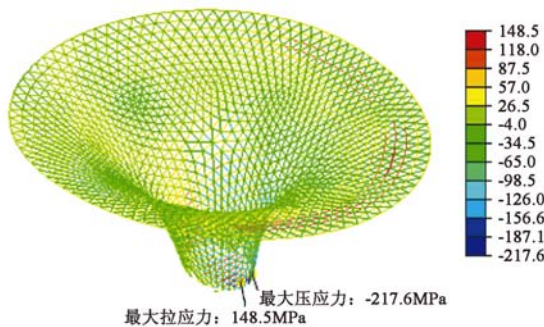


图 21 应力分布云图(单位:MPa)

Fig. 21 Stress distribution cloud

3.6 考虑杆件偏心距的阳光谷计算分析

阳光谷结构构件截面高度为 $180 \sim 500\text{mm}$ 不等,根据建筑要求,所有构件在阳光谷内侧的表面要求构成光滑曲面,因此,不同截面高度的构件之间为偏心连接,相邻构件最大偏心距为 $60 \sim 150\text{mm}$ 。

整体计算分析了杆件偏心距的影响,以阳光谷 SV4 在考虑恒荷载、活荷载、风荷载 (270° 风向角) 作用的情况下应力比为例。图 22 为 SV4 考虑偏心距前后的下半部分应力比分布图。从图中可以看出,考虑杆件偏心后,杆件的最大内力大约增加 $5\% \sim$

8% 左右。SV4 的应力比最大值为 0.911 ,为门洞两侧竖杆,其余最大值为 0.792 。

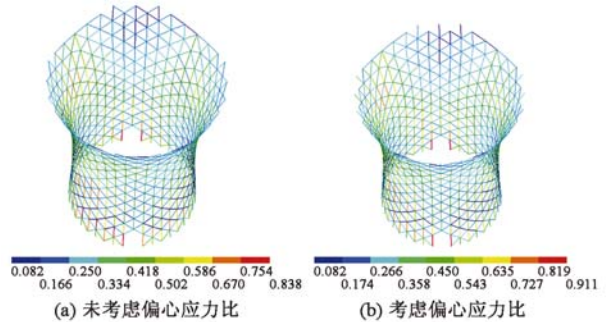


图 22 SV4 考虑偏心距前后的下半部分应力比分布云图

Fig. 22 Stress ratio cloud of SV4's second half considering eccentricity or not

4 结论

- (1) 阳光谷的竖向和水平位移满足设计要求。
- (2) 杆件在各种组合工况下的应力比最大为 0.838 ,杆件内力以轴力为主,在索膜支承点等处的杆件弯矩较大。
- (3) 罕遇地震组合作用下,杆件的单杆稳定应力没有超过钢材强度标准值,不会发生屈服。
- (4) 弹塑性时程分析表明,在罕遇地震作用下,所有杆件处于弹性状态,达到了大震弹性的抗震要求。

致谢:参与设计与研究工作的浙江大学空间结构研究中心、现代建筑设计集团技术中心、同济大学土木工程防灾国家重点实验室。

参 考 文 献

- [1] JGJ 61—2003 网壳结构技术规程[S]. (JGJ 61—2003 Technical specification for latticed shells[S]. (in Chinese))
- [2] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. (GB 50017—2003 Code for design of steel structures[S]. (in Chinese))
- [3] DGJ 08-9—2003 建筑抗震设计规程[S]. 上海:上海市建设和管理委员会,2003. (DGJ 08-9—2003 Code for seismic design of buildings[S]. Shanghai: Shanghai Municipal Construction and Management Commission, 2003. (in Chinese))
- [4] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 世博轴及地下综合体工程抗风研究风洞试验和响应计算报告[R]. 上海:同济大学,2007. (State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University. The anti-wind research about wind tunnel tests and response computations of the Expo Axis[R]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))