



世博轴大跨度索膜结构设计与研究

汪大绥¹, 张伟育¹, 方卫¹, 王荣¹, 丁生根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是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。索膜顶棚采用了连续张拉式柔性结构体系,具有大跨度、大位移、几何非线性特征较强等特点。通过研究膜材安全系数的取值、风致响应、膜面位移控制的取值方法等问题,明确了膜结构的设计原则。通过多个程序的计算分析,研究了膜材的长、短期荷载组合下的应力、变形。膜面最大应力满足设计要求,最大位移不影响建筑使用。通过结构在小风下的膜面位移分析、局部倒塌分析,论证了结构的舒适性、安全性。

关键词:大跨度索膜结构; 结构设计; 有限元分析; 防倒塌分析; 风致响应; 应力; 位移

中图分类号:TU393.3 TU318 **文献标志码:**A

Design and study of an long-span cable-membrane structure for the Expo Axis

WANG Dasui¹, ZHANG Weiyu¹, FANG Wei¹, WANG Rong¹, DING Shenggen¹, 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 Expo Shanghai 2010. Its roofing system is composed of cable-membrane structure and Sun Valley steel structures. The cable-membrane roof adopting the flexible structural system of continuous tensile membrane units featuring long span, large displacements and significant geometric nonlinearity. By studying the membrane material safety factor values, the wind-induced responses, the values of the membrane surface displacement control methods and other issues, the design principles of membrane structure were made clear. The membrane's long-and short-term stress and deformation under load combination were studied by calculation and analysis through multiple programs. It is shown that the maximum stress of the membrane meets the specifications and the maximum displacement does not affect the use of architectural features. In the light winds through the structure under the membrane surface displacement analysis, partial collapse analysis, the comfort and safety of the structure are demonstrated.

Keywords: long-span cable-membrane structure; structural design; finite element analysis; failure analysis; wind-induced response; stress; displacement

基金项目: 国家科技支撑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(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核心,南北长1045m,东西宽地下99.5~110.5m,地上80m。世博轴顶棚包括两个不同类型的结构体系:索膜结构和6个建筑造型独特的钢结构“阳光谷”,6个阳光谷共提供给膜结构18个支撑点,将两者结合成整个顶棚结构(图1、2)。

索膜顶棚覆盖了10.5m标高平台层的大部分空间,起到遮阳挡雨的功能,满足大量人流安全、舒适地从地上出入园、等候、安检、票检、休憩餐饮的需要。膜面结构造型轻盈优雅,与通透挺拔的阳光谷浑然天成。

顶棚结构平面图、剖面图见图3~5。



图1 建筑效果图

Fig.1 Architectural renderings

2 结构体系

索膜顶棚采用连续的张拉式索膜结构体系,总长度约840m,最大跨度约97m,膜面总投影面积约61000m²,展开总面积约65000m²,单块膜最大展开面积约1800m²,膜面单元一般呈三角形。膜材采用A

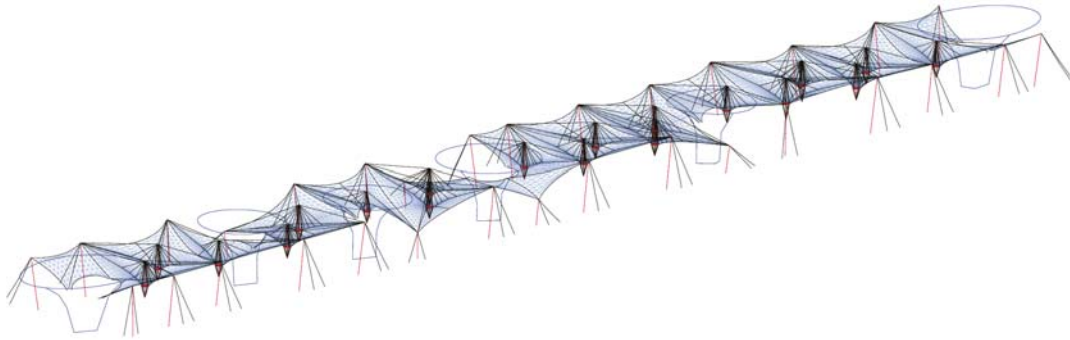


图2 索膜结构模型

Fig.2 Model of cable-membrane structure

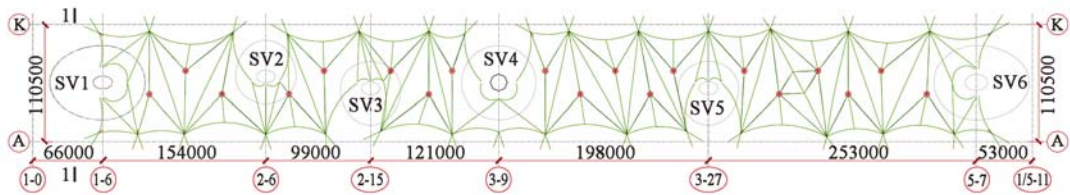


图3 顶棚平面图

Fig.3 Roof plan

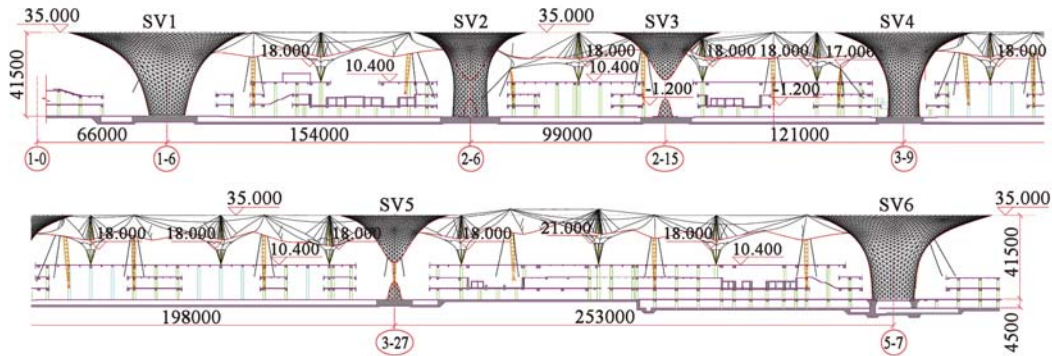


图4 建筑纵剖面图

Fig.4 Structural longitudinal section diagram

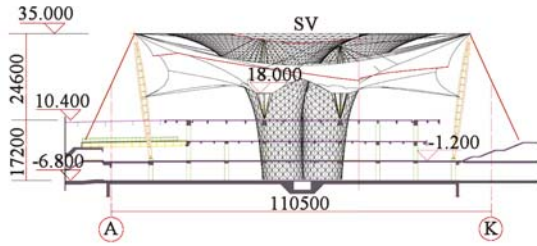


图5 建筑 1-1 剖面图

Fig. 5 Cross section diagram

级 PTFE 膜。

索膜结构边索单跨最大约 80m,脊索最大跨度约 115m,为大跨度柔性结构。膜顶主要由承重作用的脊索、边索和稳定作用的张拉膜构成(图 6),1 根边索、2 根脊索和膜形成了三角形为顶面的倒锥台状,膜面为双向曲面,膜焊缝主要沿经向放射形布置。整个膜顶支承于外桅杆、内桅杆及阳光谷钢结构上。

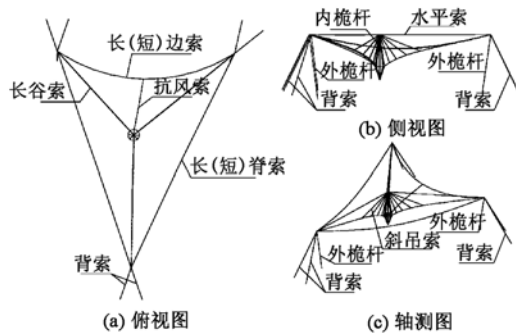


图6 索结构示意图

Fig. 6 Layout of cables

索膜结构的最高点由 26 组外桅杆和背索、部分阳光谷的连接点构成,最低点由 19 组内桅杆下拉点、5 组外桅杆和背索、部分阳光谷的连接点构成。外桅杆一般高度为 35m,紧邻中间 4 个阳光谷均有 1 根较低的外桅杆(高度为 17m),阳光谷 SV5、SV6 之间外桅杆高度为 38m。下拉点处,膜在 18m 或 21m 标高处固定在下拉钢环上(钢环直径 5m),钢环支承于内桅杆。

内桅杆的增设,主要控制风荷载作用下膜下拉处的水平位移及向下位移。内桅杆与外桅杆顶部由水平索连接,水平索的增设,协调了内外桅杆的水平位移,由背索、外桅杆、水平索、内桅杆、外桅杆、背索形成了稳定的结构体系。内桅杆顶部设斜吊索与谷索相连,以控制膜的向下位移。

索膜顶棚两端 4 片膜为四边形,每片膜对角线设有 1 根抗风索。支于边索的膜片上设有 1 根抗风的短谷索。外桅杆后背索最粗,为 $\Phi 155$,脊索为 $\Phi 110$,边索为 $\Phi 70$,谷索为 $\Phi 65$ 。

3 设计依据和条件

3.1 设计依据

按现行国家结构设计有关规范及标准,并且参考国外相关标准。

现行国家及上海市地方设计规范及标准:CECS 158:2004《膜结构技术规程》、DGJ 08-97—2002《膜结构技术规程》(上海)、DG/TJ 08-2019—2007《膜结构检测技术规程》(上海)、DG/TJ 08-019—2005《建筑结构用索应用技术规程》(上海)。

参考国外相关标准:《欧洲张力薄膜结构设计指南》^[1]、《膜结构建筑物技术标准》^[2]等。

结构设计使用年限为 50 年。膜材可在使用年限内更换。

重要性系数取值:膜强度计算取为 1.0,钢柱、索及阳光谷计算取 1.1。

3.2 荷载作用

3.2.1 恒荷载

膜、索自重(膜面密度取 $1.6\text{kg}/\text{m}^2$)。

3.2.2 风荷载

地面粗糙类别取 C 类。在膜结构风荷载效应的计算中,通过风洞试验得到了膜结构物理模型的风压分布与时程^[3];并根据场馆周边环境的变化分别考虑了世博会中和世博会后两种情况;将风压施加在 ANSYS 模型上(同时施加预应力、恒荷载及活荷载)进行时程分析,得到索、膜的内力时程;根据分析所得到的索、膜内力进行强度复核。

为了进行多个程序(EASY、ANSYS 等)的计算比较,以结构内力为主要目标,取不同风振系数进行静力 ANSYS 不同风向角度、短期荷载不同组合的试算,按内力最大值相近、内力分布趋势相仿为原则,与风洞试验时程的计算结果比较,最终确定多程序计算时的风振系数为 1.5。

3.2.3 雪荷载

雪荷载取 $0.3\text{kN}/\text{m}^2$ 。依据《欧洲张力薄膜结构设计指南》^[1]第 7.5.4 条中规定:必须设计清除积雪的方法,通过切实可行的除雪方法是积雪不超过其限值降低雪荷载唯一有效的方法。

在本工程膜结构维护和保养手册中,将对排雪作出相应的应急措施要求,如在极端条件下的大雪天气,组织专业人员清扫积雪,防止屋面积雪结冰。

3.2.4 地震作用

根据 CECS 158:2004 第 5.1.5 条中规定:对膜结构中的索、膜构件,可不考虑地震作用的影响;支承结构的抗震设计,应按照国家有关标准的规定执行。

且由于膜结构自重很小,在地震作用下不会产

生较大的惯性力,不会对膜结构造成危害。但结构中的桅杆和连接等重型构件在地震作用下将产生较大的加速度反应。

在索膜结构计算中,未考虑索膜结构的地震作用,但考虑了内外桅杆柱脚等节点的抗震构造设计。

3.3 荷载组合

3.3.1 单一安全系数设计方法

由于本工程膜结构的几何非线性反应强烈,采用了单一安全系数法进行设计。

膜材安全系数在施工图设计阶段,通过对各国设计标准的研究^[1,2,4,5],短期荷载组合下取 4.0,长期荷载组合下取 8.0;材料强度标准值符合 95% 的保证率。索的安全系数取 2.5。

3.3.2 膜结构荷载组合

膜结构整体计算过程中,可考虑几何非线性荷载效应组合,表 1 为荷载组合工况。

表 1 荷载组合工况

Table 1 Type of load combination

组合类别	工况
长期组合	工况 1: 恒荷载 G + 预拉力 P
	工况 2: 恒荷载 G + 预拉力 P + 雪荷载 Q
短期组合	工况 3: 恒荷载 G + 预拉力 P + 风荷载 W
	工况 4: 恒荷载 G + 预拉力 P + 雪荷载 Q + 0.7 风荷载 W

3.4 膜材料

膜材采用的基材为玻璃纤维、涂层为聚四氟乙烯 PTFE 的 A 级膜材,膜材力学性能见表 2。

表 2 膜材力学性能

Table 2 Mechanical property of membrane

方向	抗拉强度 /kN · m ⁻¹	强度设计值/kN · m ⁻¹		弹性模量 /kN · m ⁻¹
		长期组合	短期组合	
经向	173.3	21.67	43.33	1362
纬向	156.7	19.58	39.17	976

3.5 索材料

索由优质高强度碳素钢材制造,钢丝的抗拉强度大于 1770N/mm²;钢丝采用热镀锌防腐,钢丝绳的弹性模量大于 2.0 × 10⁵ MPa;护层采用高密度聚乙烯 (HDPE)。各种索类型见表 3。

3.6 索膜结构的位移控制

膜结构中的索、膜构件仅承受拉力,不承受压力和弯矩作用,对外荷载的抵抗主要通过变形来实现,因而膜结构在外荷载作用下的变形较大,计算时考虑了结构的几何非线性。

索膜结构在短期荷载组合下膜面位移控制综合考虑了文献[2]和 CECS 158:2004《膜结构技术规程》的要求,控制最大膜面位移扣除相关索的位移后

小于支点之间距离的 1/10。这个控制标准,主要是尽量减小风荷载引起膜面抖动、大变形以及人的心理感受等方面考虑。膜面位移为相对于常时状态(工况 1)膜面上的同一点变形前后的距离,即:

$$\frac{\Delta_M - \Delta_C}{\frac{2}{3} \cdot \min(l_1, l_2, l_3)} \leq \frac{1}{10}$$

式中符号示意图 7。

表 3 索类型

Table 3 Characteristics of different cables

索	直径/mm	
背索	高桅杆	155.20
	低桅杆	119.00
脊索	长脊索	110.00
	短脊索	76.90
边索	长边索	70.60
	短边索	50.80
谷索	长谷索	65.00
	短谷索	50.80
抗风索	31.40	
水平索	50.80	

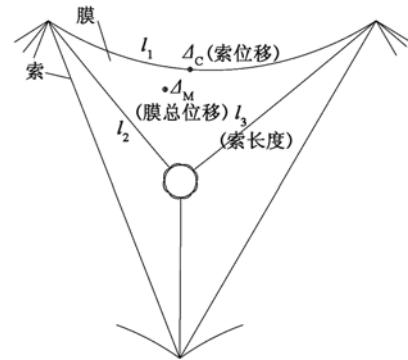


图 7 膜面位移示意图

Fig. 7 Parameter definition for relative displacement calculation of membrane

4 结构设计与分析

4.1 结构动力特征

结构以索的振动为主(图 8),首先出现的是边索、谷索的振动,振型密集。结构的低阶振型均为不同膜片单元中索的振动,表明了结构的高度柔性 with 高度非线性特性。

4.2 膜面应力及位移

4.2.1 膜面初始预应力分布

膜面初始应力取 5kN/m(图 9),因结构跨度大,膜面找形同时考虑了预应力与重力的影响(工况 1)。EASY 程序找形中经向应力较大点在外桅杆的角部膜片上,纬向应力较大点在索边膜片上;ANSYS 程序

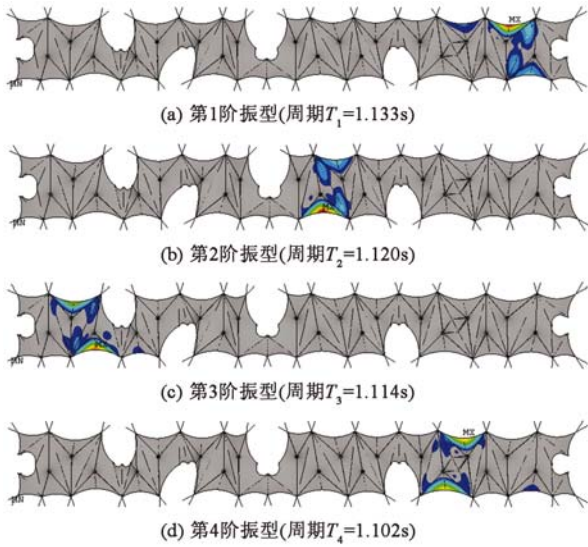


图 8 结构前 4 阶振型
Fig. 8 First four modes of roof

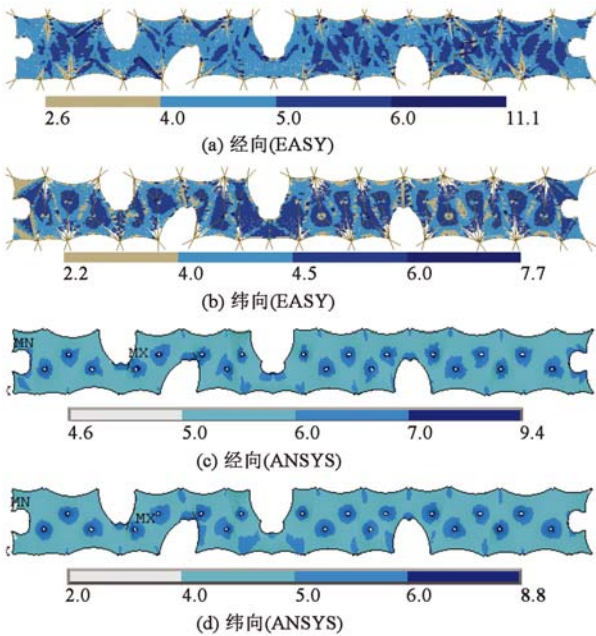


图 9 膜面找形后的初始预应力云图(单位:kN/m)

Fig. 9 Distribution of membrane's initial prestress

找形中应力较大处在下拉环、外桅杆的角部等膜片上。经现场实测,上述部位均出现较大应力。

4.2.2 长期荷载组合下膜面应力和位移

工况 2 下 EASY、ANSYS 分析得到的膜面应力结果见图 10(图 10 中的放大区域见图 11、12)。

膜面经向应力最大值, ANSYS 计算中出现在阳光谷 SV2 附近索边一个膜片计算单元上, 为 26.02kN/m(图 11a), EASY 计算中出现在阳光谷 SV1 附近平坦膜处索边一个膜片计算单元上, 为 25.3kN/m(图 12a)。三角形膜单元中, 经向应力一般由高至低、由高处索边往低处膜面, 逐渐减小(图 13a), 次最大经向应力为 19.4kN/m (EASY)、

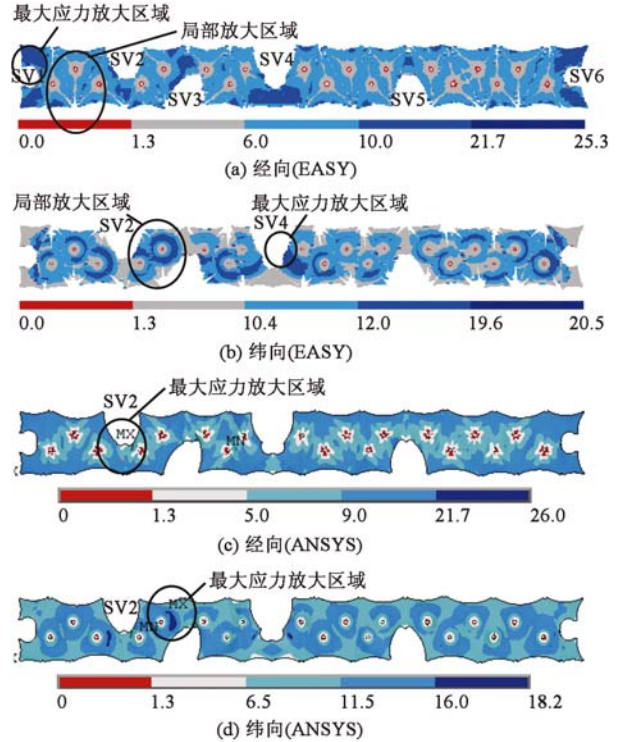
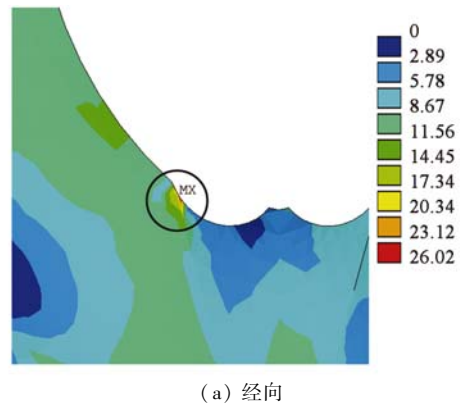
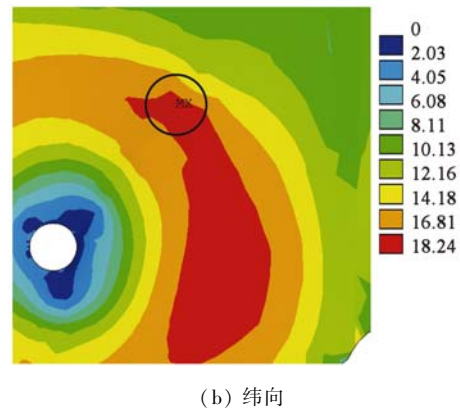


图 10 长期荷载组合下膜面应力云图(kN/m)

Fig. 10 Distribution of membrane's stress under long-term load combination



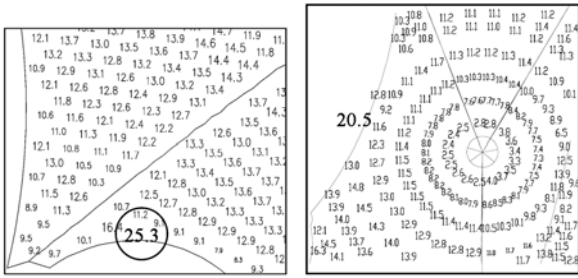
(a) 经向



(b) 纬向

图 11 膜面最大应力区域放大云图
(单位:kN/m) (ANSYS)

Fig. 11 Details of membrane's maximum stress

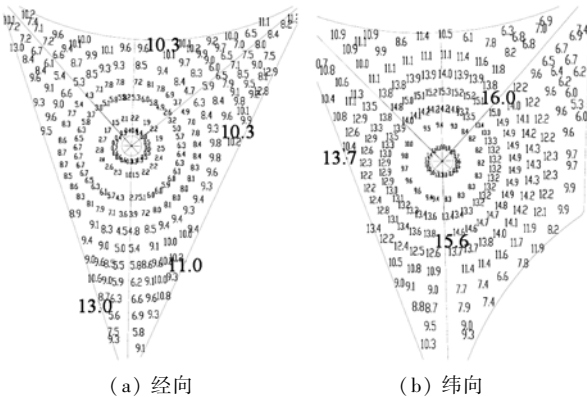


(a) 经向 (b) 纬向
图 12 膜面最大应力区域放大图(单位:kN/m)(EASY)
Fig. 12 Details of membrane's maximum stress

20.64kN/m(ANSYS)。

纬向应力最大值仅出现在阳光谷 SV4 附近索边一个膜片计算单元上,为 20.5kN/m(EASY)(图 12b)。三角形膜单元中,向下荷载引起离下拉环一定距离处膜面纬向应力的增大(图 13b),次最大纬向应力为 18.24kN/m(ANSYS)(图 11b)。

从计算结果看,虽然经、纬向应力最大值均有一处超过膜材强度设计值,但仅仅是出现在范围非常小的一个计算单元中,均在索边的位置(计算中单元划分不合理导致的奇异现象),与相邻单元取均值后,满足膜材强度要求,并且膜面在长期荷载作用下的应力还会重分配,因此,认为这一计算结果是符合设计要求的。

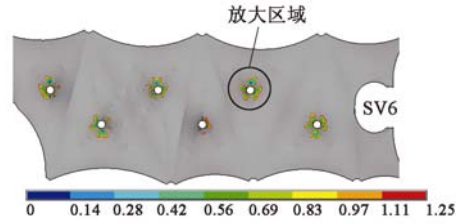


(a) 经向 (b) 纬向
图 13 局部膜面应力放大图(单位:kN/m EASY)
Fig. 13 Details of membrane's stress

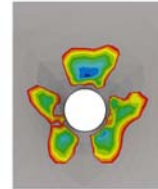
平坦膜面处,膜面经纬向应力分布比较均匀,一般最大应力为 18kN/m(EASY)、16.7kN/m(ANSYS)。

下拉环附近普遍膜面松弛。应力不能满足 CECS 158:2004《膜结构技术规程》第 5.3.5 条中膜面最小折算应力在长期荷载组合下不小于初始张拉力的 25% 的要求(图 10、14),这些区域变形后角度均大于 28°,不易积雪,小部分的积雪也容易处理^[6]。

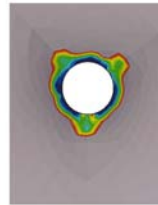
膜面最大向下位移出现在阳光谷 SV4 附近面积较大的两片膜面上,最大值为 1.90m(ANSYS)、



(a) 局部平面



(b) 经向



(c) 纬向

图 14 膜面应力小于 1.25kN/m 的局部放大图(单位:kN/m)

Fig. 14 Details of membrane's stress being less than 1.25kN/m

2.46m(EASY)(图 15、16、17)。索膜顶棚两端 4 片四边形膜较为平坦,位移为 2m(EASY)。

世博轴膜结构中膜焊缝主要沿经向放射形布置,传递环向应力。相对于焊缝的布置方式,膜结构的经向强度受膜材强度控制,膜材强度与长期荷载组合的次最大应力的比值为 8.4(单层膜);纬向强度受焊缝强度控制,膜材强度与长期荷载组合的次最大应力的比值为 8.6(单层膜),可见膜材在长期荷载组合下具有一定的安全储备。

4.2.3 短期荷载组合下膜面应力和位移

由风洞试验得出的风荷载分布云图可见(图 18),迎风面的膜面上承受向上的荷载,背风向的膜面上承受向下的荷载^[3]。

膜面上下位移较大处均出现在边索支承的膜片单元上及两端阳光谷 SV1、SV6 旁的 4 片平坦膜上(图 19)。三角形膜单元中,膜面最大向上位移出现在迎风面与边索相连的膜片中偏上部(图 20),膜面最大向下位移出现在背风向与边索相连的膜片偏上部(图 21、22)。这些膜片单元都是膜面受风面积较大的区域,且刚度较弱,故位移较大。

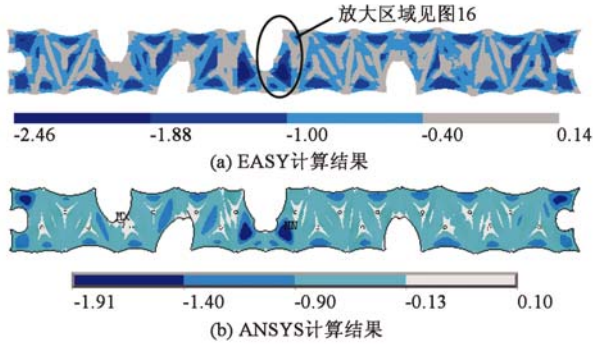


图 15 长期荷载组合下膜面位移图 (单位:m)
Fig. 15 membrane's displacement under long-term load combination

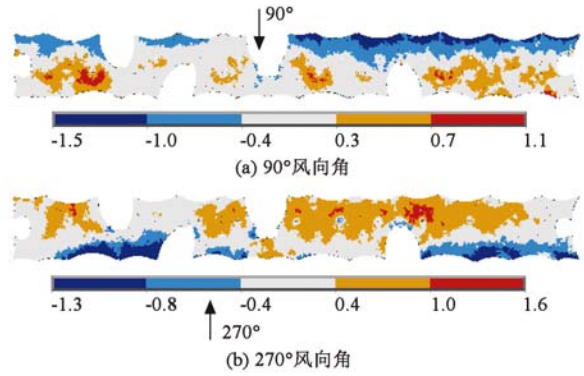


图 18 风荷载分布云图 (单位:kN/m²)
Fig. 18 Distribution of wind load

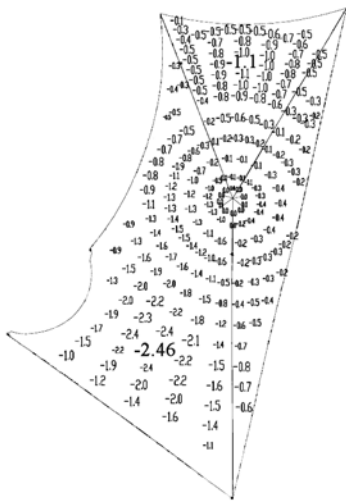


图 16 长期荷载组合下单块膜面位移放大图 (单位:m) (EASY)
Fig. 16 Single membrane's displacement under long-term load combination

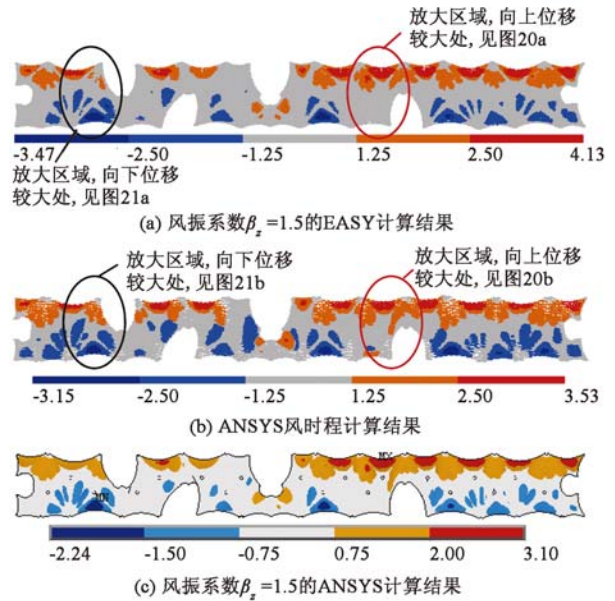


图 19 恒荷载 G + 预拉力 P + 90°风荷载(会中)工况下膜面位移云图 (单位:m)
Fig. 19 membrane's displacement under $G + P + 90^\circ$ Wind (during EXPO) load case

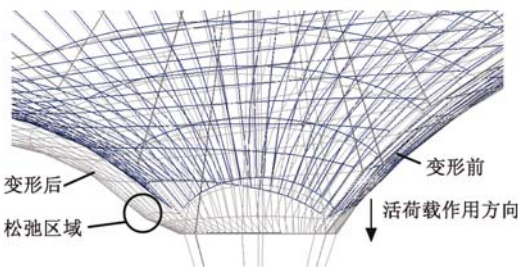


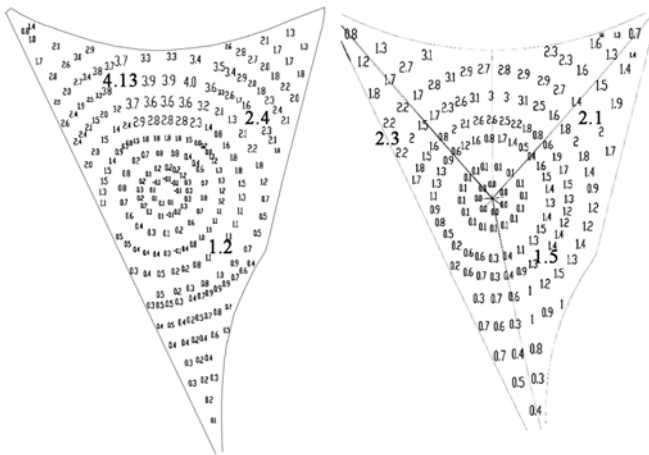
图 17 长期荷载组合下下拉点膜面位移示意图
Fig. 17 Schematic diagram of drop-down point membrane's displacement under long-term load combination

三角形膜单元的周边支座为下拉环和索,下拉环相对索来说更接近于刚性支座,且该处膜边界尺寸较小,同样的支座反力引起的应力大于膜边界尺寸较大位置的膜面应力,因此在上吸风作用下,更易引起下拉环附近膜面经向应力的增大;而在下压风作用时,离下拉环一定距离处膜面产生“环箍”效应

以抵抗下压风,故产生了该处膜面环向应力的增大(图 23)。

计算分析采用了 EASY、ANSYS 程序,其中,ANSYS 计算程序对于风荷载效应又分别有风时程和风振系数 1.5 的计算方法。计算结果表明,在短期荷载组合时,风向角为 90°、225°、270°风荷载作用下,膜面会出现较大的应力。膜面经向应力较大区域主要集中在内桅杆下拉环附近(图 24);在三角单元的膜面内,由下拉环向外扩散,在每根谷索上布置了 3~4 处吊索,由于吊索约束了膜面的向下位移,在吊点处有应力集中现象,对以上区域采用了双层膜加强(图 25、26)。

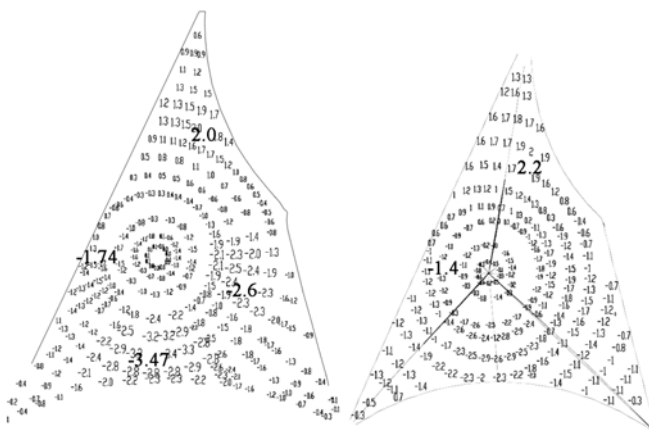
膜面经向最大应力为 74.8kN/m(EASY,90°风向角,会中)(图 24)。膜面纬向最大应力为 55.7kN/m(ANSYS 风时程,90°风向角,会中)。膜结构的经向



(a) EASY 计算结果 (b) ANSYS 风时程计算结果

图 20 膜面向上位移较大区域放大图(单位:m)

Fig. 20 Detail of upward displacement



(a) EASY 计算结果 (b) ANSYS 风时程计算结果

图 21 膜面向下位移较大区域放大图(单位:m)

Fig. 21 Detail of downward displacement

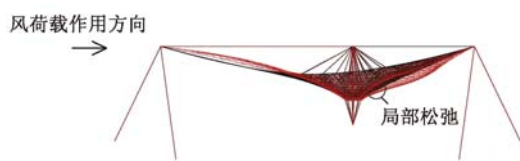
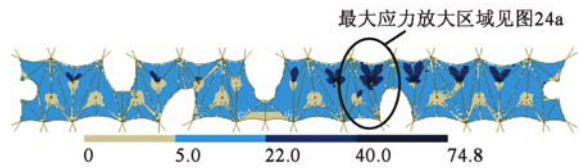


图 22 膜面变形立面图

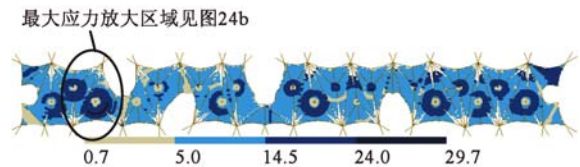
Fig. 22 Elevation of membrane's deformation

强度受膜材强度控制,膜材强度与短期荷载组合的最大应力的比值约为 4.17(双层膜);纬向强度受焊缝强度控制,膜材强度与短期荷载组合的最大应力的比值约为 5.06(双层膜)。

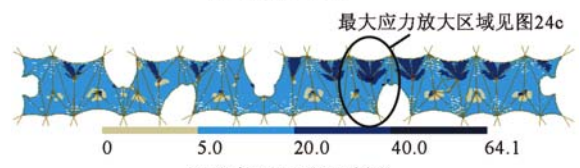
单层膜区域,最大经向应力为 40.5kN/m (EASY,90°风向角,会中),位于下拉点双层膜加强区边,膜材强度与短期荷载组合的最大应力的比值约为 4.28(单层膜);最大纬向应力为 33.7kN/m (ANSYS 风时程,225°风向角,会中),位于距离下拉点一定距离的膜面处,膜材强度与短期荷载组合的最大应力的比值约为 4.64(单层膜)。



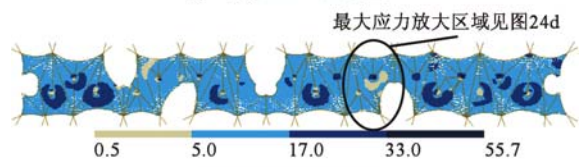
(a) 经向(EASY)



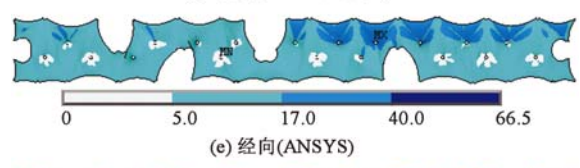
(b) 纬向(EASY)



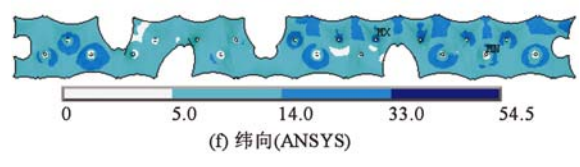
(c) 经向(ANSYS风时程)



(d) 纬向(ANSYS风时程)



(e) 经向(ANSYS)



(f) 纬向(ANSYS)

图 23 膜面应力分布图(恒荷载 G + 预应力 P + 风荷载(90°风向角,会中))(单位:kN/m)

Fig. 23 Distribution of membrane stress ($D + P + 90^\circ$ Wind(during Expo))

膜面最大向上位移为 4.16m (EASY,45°风向角,会中),扣除相应位置索变形引起的膜面位移 2.69m,膜面相对位移约为 1/18,位于阳光谷 SV6 边的外侧三角膜单元处;膜面最大向下位移为 3.78m (EASY,0.7×风荷载(225°风向角),会中),扣除相应位置索变形引起的膜面位移 1.74m,膜面相对位移约为 1/18,位于阳光谷 SV4 边四边形膜单元的平坦膜面。

表 4 为 ANSYS 风时程与风振系数 1.5 的计算结果比较,从表中可见,最大值均为风振系数 1.5 的计算结果,当风时程的计算结果为最大值时,膜面应力差值均在 3% 以内。

4.3 小风作用下的膜面位移分析

根据上海气象局 1956—1990 年的风频率资料,在统计的 35 年内,上海地区 5~7 级风平均每年出现

表4 ANSYS 风时程与风振系数 1.5 计算结果比较

Table 4 Calculating results with wind time-history method and considering wind flutter factor $\beta_z = 1.5$ method

计算参数	恒载 + 预应力 + 风载 (90°风向角, 会中)			恒载 + 预应力 + 风载 (225°风向角, 会中)			恒载 + 预应力 + 风载 (270°风向角, 会中)			恒载 + 预应力 + 活载 + 0.7 × 风载(225°风向角, 会中)			
	风时程	风振系数 1.5	差值	风时程	风振系数 1.5	差值	风时程	风振系数 1.5	差值	风时程	风振系数 1.5	差值	
膜面应力 /kN · m ⁻¹	经向最大	64.14	66.56	-3.6%	51.6	55.61	-7.8%	41.84	44.71	-6.9%	40.78	104.3	-156%
	纬向最大	55.66	54.51	2.1%	54.44	61.04	-12.1%	45.22	51.36	-13.6%	33.04	36.29	-9.8%
索内力 /kN	背索(高桅杆)	7352	7795	-6.0%	6895	7511	-8.9%	7191	7877	-9.5%	7542	7514	0.4%
	背索(低桅杆)	3390	2912	14.1%	4084	4244	-3.9%	4299	4167	3.1%	4604	4535	1.5%
	长脊索	1346	1226	8.9%	2161	2409	-11.5%	1911	1749	8.5%	2450	2554	-4.2%
	长边索	1563	1606	-2.8%	1179	1330	-12.8%	1316	1330	-1.1%	1126	1181	-4.9%
桅杆内力 /kN	17m 桅杆	-2007	-1934	3.6%	-2501	-2543	-1.7%	-2741	-2771	-1.1%	-3045	-2959	2.8%
	35m 桅杆	-9140	-9683	-5.9%	-8102	-8986	-10.9%	-8703	-9276	-6.6%	-9761	-9877	-1.2%
	38m 桅杆	-11640	-11560	0.7%	-11270	-12325	-9.4%	-11580	-12548	-8.4%	-12920	-13529	-4.7%
内桅杆柱脚 最大反力/kN		1623	1628	-0.3%	941	1223	-30.0%	1188	1367	-15.1%	—	190	—
		(拉)	(拉)		(拉)	(拉)		(拉)	(拉)		(拉)	(拉)	
外桅杆柱脚 最大反力/kN		-620	-324	47.7%	-893	-930	-4.1%	-721	-567	21.4%	-983	-962	2.1%
		(压)	(压)		(压)	(压)		(压)	(压)		(压)	(压)	
外桅杆柱脚 最大反力/kN		12084	11888	1.6%	11711	12645	-8.0%	12071	12945	-7.2%	13356	13840	-3.6%
		(压)	(压)		(压)	(压)		(压)	(压)		(压)	(压)	

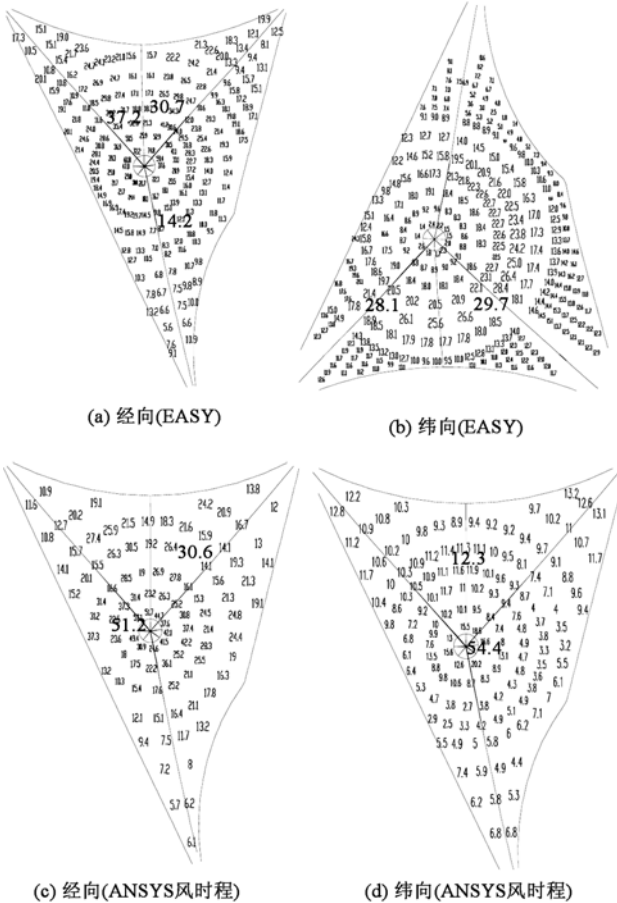


图24 膜面最大应力区域放大图(单位:kN/m)

Fig. 24 Detail of membrane's maximum stress

14.5次,8级风平均每年出现1~2次,9级以上的大风出现机率较小。极端风荷载一般发生在夏季台风来临时,此时风向混乱。虽然在极端风荷载作用下

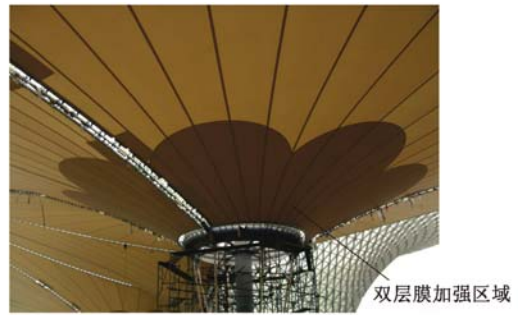


图25 下拉点膜面焊接加强区域照片

Fig. 25 Membrane reinforcement of welds at drop-down point

膜面位移较大,但极端风发生概率较小。据此需要了解大概率风荷载作用下的膜面位移情况,该位移对平台上人群的心理感受会有影响。小风分析考虑了6级风和8级风。表5为风荷载取值。

表5 风荷载取值
Table 5 Wind load value

风级	6级	8级	11级
风速/m · s ⁻¹	10.8 ~ 13.8	17.2 ~ 20.7	28.5 ~ 32.6
风压/kN · m ⁻²	0.073 ~ 0.119	0.185 ~ 0.208	0.508 ~ 0.664

计算得到不同风向短期荷载组合下位移向上、向下的包络值。6级风作用下,膜面最大向上位移1.229m,最大向下位移为0.960m(图27);8级风作用下,膜面最大向上位移2.286m,最大向下位移为1.995m(图28)。相对建筑尺寸,小风下的膜面位移较小,在平时发生,是可以接受的。同时分析结果表明,结构表现出较强的几何非线性,荷载的减小并未使结构产生的位移线性的减小。

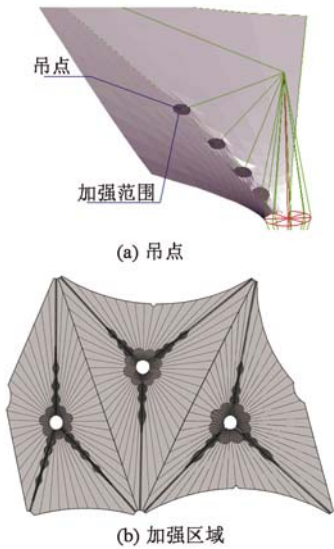


图 26 吊索点处膜加强图

Fig. 26 Membrane reinforcement on suspension points

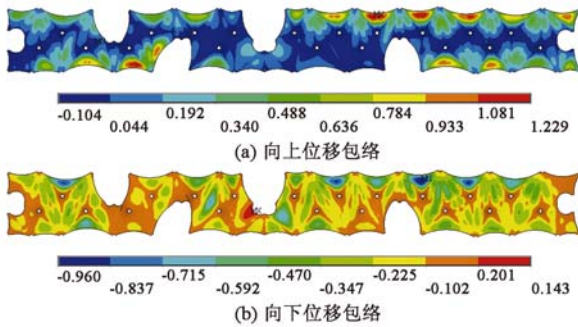


图 27 6 级风荷载作用下膜面位移包络图(单位:m)

Fig. 27 membrane's envelope displacement under 6 class wind load

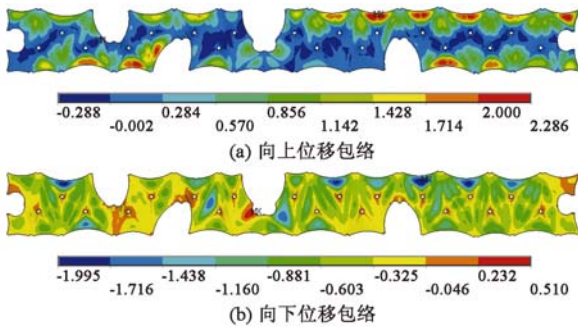


图 28 8 级风荷载作用下膜面位移包络图(单位:m)

Fig. 28 membrane's envelope displacement under 8 class wind load

4.4 张拉索膜结构局部倒塌分析

张拉索膜结构设计中应避免连续倒塌,《欧洲张拉索膜结构设计指南》^[1]中将其考虑为一种附加荷载工况,对结构局部失效而发生连续倒塌进行分析。因此,研究了索膜结构的防倒塌性能;在局部两根背索破坏,相应的一根外桅杆失效,一片或两片附近膜片失效情况下,计算分析了整体结构在恒载+预拉

力+风荷载(90°风向角)工况下的膜面和索的应力及变形。

图 29~31 为 1 号节点处背索破坏后膜面变形和内力分析结果,图 32~34 为 48 号节点处背索破坏后膜面变形及内力云图。由图 29~34 可见,1 号节点(桅杆)处 2 根背索破坏后,与该点处的膜相连的索内力有较大变化,其中以与之相连的短谷索内力变化最为强烈,由 139kN 增加到 527kN;相邻的桅杆背索内力变化也较大(由 2774kN 增进到 4010kN,但都未达到索的破断力。48 号节点(桅杆)处 2 根外桅杆背索破坏后,与之相邻的索内力有较大变化,其中边索内力由 857kN 增加到 1245kN,但都未达到索的破断力;其它部分索都有松弛现象,内力大幅减小。索膜结构在上述两种情况下均未发生连续失效。临近失效区域的膜面发生松弛,相邻部分膜面应力则会增大,但未超过膜材的极限强度;与破坏背索相连索的内力会增大,部分索内力会有较大幅度的增加,但由于索的设计保证有一定的安全度,使得背索破坏后与之相连的索的内力不超过其破断强度。

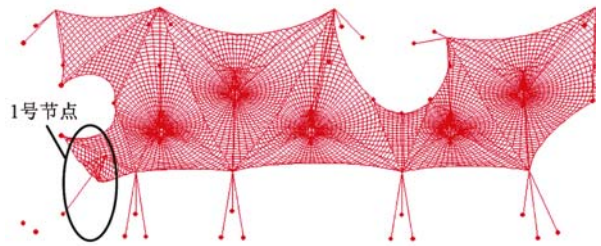
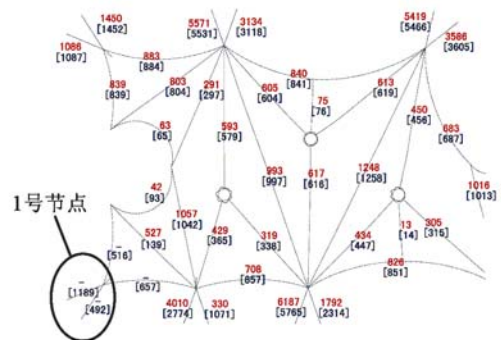


图 29 1 号节点处背索破坏后膜面变形

Fig. 29 membrane's deformation after back stay cable broken of No. 1 outer mast



注:图中数值为 1 号节点处背索破坏后各索内力值, [] 内的数值为破坏前的内力值,“-”表示该处索松弛
图 30 1 号节点处背索破坏后索内力分析(单位:kN)

Fig. 30 Cable's internal force after back stay cable broken of No. 1 outer mast

4.5 带阳光谷的膜结构整体分析

顶棚结构包括有阳光谷钢结构和索膜结构,阳光谷为索膜结构提供 18 个支撑点,将两者结合在一起。为简化计算,实际分析时考虑分开建立计算模

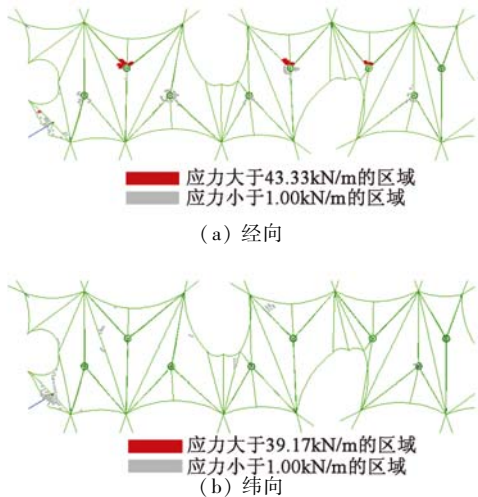


图 31 1 号节点处背索破坏后膜面应力
Fig. 31 membrane's stress after back stay cable broken of No. 1 outer mast

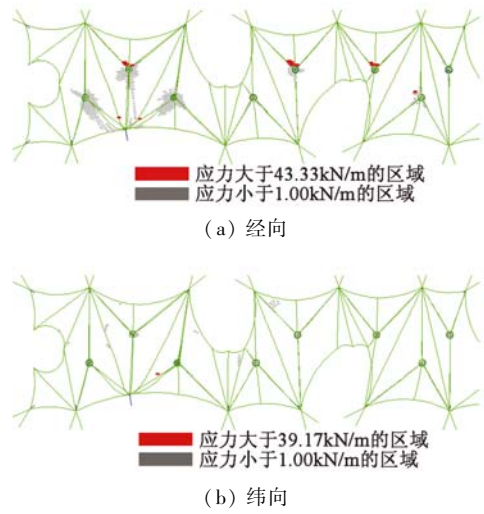


图 34 48 号节点处背索破坏后膜面应力
Fig. 34 membrane's stress after the back stay cable broken of No. 48 outer mast

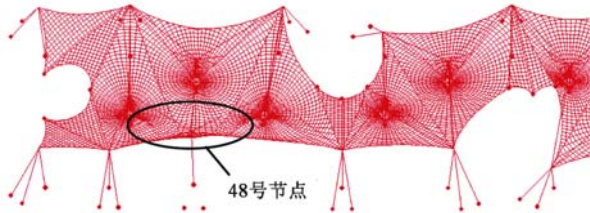


图 32 48 号节点处背索破坏后膜变形
Fig. 32 membrane's deformation after back stay cable broken of No. 48 outer mast

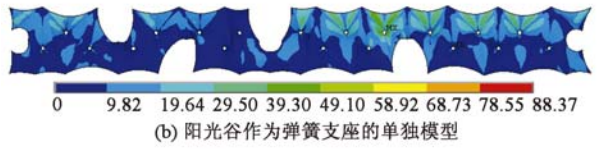
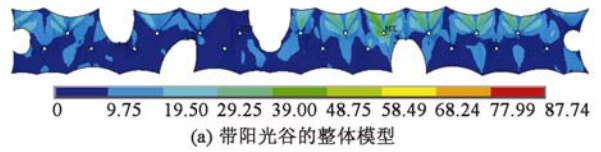
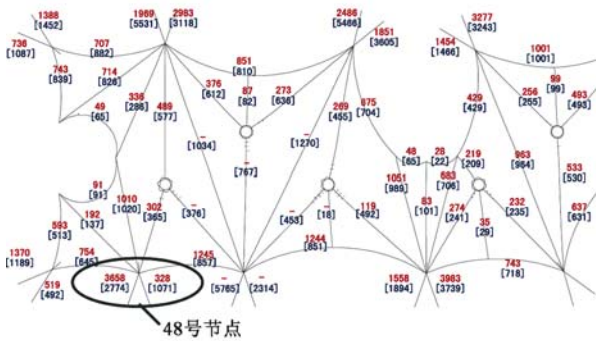


图 35 经向应力结果比较(单位:kN/m)
Fig. 35 Comparison of warp stress



注:图中数值为索破坏后的索内力值,[]内的数值为索破坏前的内力值,“-”表示该处索松弛

图 33 48 号节点处背索破坏后索内力分析(单位:kN)
Fig. 33 Cable's internal force after back stay cable broken of No. 48 outer mast

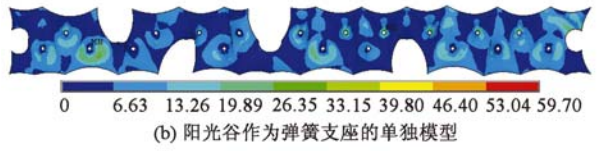
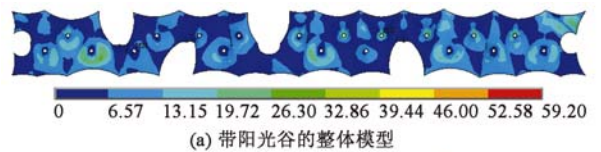


图 36 纬向应力结果比较(单位:kN/m)
Fig. 36 Comparison of weft stress

型,将阳光谷模拟为索膜结构的弹簧支座。为验证阳光谷作为弹簧支座其刚度系数取值的正确性,分析时取一种荷载工况,将估算的支座刚度代入单独的索膜结构计算模型进行分析,与二者一起建模协同分析的计算结果进行比较。

图 35、36 为初步设计阶段带阳光谷的整体模型和阳光谷作为索膜结构的弹簧支座的单独模型在工况 3 下的膜面经、纬向应力计算结果的比较。两种情

况下的膜面最大应力非常接近、应力分布趋势一致,可见弹簧支座刚度的取值是合理的,将两者分开分析的方法也是可行的。

5 结论

世博轴索膜顶棚采用了连续张拉式结构体系,具有大跨度、大位移、几何非线性特征较强等特点,通过对结构体系一系列的研究和分析,结论如下:

(1) 通过研究膜材安全系数的取值、风致效应、

膜面位移控制的取值方法等问题,明确了膜结构的设计原则。

(2)通过两个程序的计算分析,研究了膜材在长、短期荷载组合下的应力及变形。膜面最大应力满足设计要求,最大位移不影响建筑的使用功能。

(3)通过结构在小风下的膜面位移分析、局部倒塌分析,保证了结构的舒适性、安全性。

致谢:参与设计与研究工作的浙江大学空间结构研究中心、同济大学新型结构研究室、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] (英)福斯特,(比)莫莱尔特. 欧洲张力薄膜结构设计指南[M]. 杨庆山,姜忆南,译. 北京:机械工业出版社, 2006. (Brian Forster, Marijke Mollaert. European design guide for tensile surface structures [M]. Translated by YANG Qingshan and JIANG Yinan. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese))
- [2] 膜構造の建築物・膜材料等の技術基準及び同解説[S]. (社)日本膜構造協会, 1996. (Technical standards for special membrane structure buildings[S]. The Membrane Structures Association of Japan, 1996. (in Japanese))
- [3] 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 report of wind resisting research about wind tunnel tests and response computations for the Expo Axis[R]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [4] ASCES Tensile membrane structures(draft)[S]. 2002.
- [5] Joorg Minte. Das Mechanische Verhalten von Verbindungen beschichteter chemiefasergewebe [D]. Aachen: Technischen Hochschule Aachen, 1981. (Joorg Minte. Mechanical behaviour of joints of coated man made fibre fabrics [D]. Aachen: Aachen University of Technology, 1981. (in German))
- [6] 陈务军. 膜结构工程设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004. (Chen Wujun. Design of membrane structure engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese.))