

风荷载作用下气膜模板变形的数值仿真模拟

杨斌, 郭晓*, 凌雨

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2024年6月15日; 录用日期: 2024年7月8日; 发布日期: 2024年7月15日

摘要

随着我国异形结构建筑的不断发展, 充气膜结构作为一种创新的模板体系, 已逐步应用于施工领域。相较于传统的模板体系, 气膜模板具备成本低、施工周期短、安全性能高等优势。然而, 由于其自身刚度较低, 施工过程中易受到外荷载影响而产生变形, 造成混凝土结构成形后带有初始缺陷, 降低使用寿命。本文主要考虑膜材的材料特性是否为线性对变形的影响, 运用ANSYS有限元分析软件, 计算4~6级风荷载作用下气膜模板的变形, 对比材料特性不同时结构的变形差异。结果显示, 在风荷载作用下, 膜材剪切模量的非线性特征不可忽略, 风荷载越小, 剪切模量非线性对变形的影响越明显; 当风荷载达到6级时, 结构变形超出合理线形范围, 应当停止或暂缓施工。

关键词

气膜模板, 材料特性, 非线性, 有限元

Numerical Simulation of Deformation of Inflatable Membrane Formwork under Wind Load

Bin Yang, Xiao Guo*, Yu Ling

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 15th, 2024; accepted: Jul. 8th, 2024; published: Jul. 15th, 2024

Abstract

With the continuous development of special-shaped structures in China, inflatable membrane structure, as an innovative formwork system, has been gradually applied in the construction field.

*通讯作者。

Compared with the traditional formwork system, the inflatable membrane formwork has the advantages of low cost, short construction period and high safety performance. However, due to its low rigidity, it is easy to be affected by external loads during construction, resulting in initial defects after the concrete structure is formed and reduced service life. This paper mainly considers whether the material properties of the membrane are linear on the deformation, using ANSYS finite element analysis software, calculates the deformation of the inflatable membrane formwork under the action of 4~6 wind loads, and compares the deformation difference of the structure with different material characteristics. The results show that the nonlinear characteristics of shear modulus can not be ignored under wind load, the effect of shear modulus nonlinearity on deformation becomes more obvious with the gradual reduction of wind load. When the wind load reaches level 6, the structure deformation exceeds the reasonable shape range, and the construction should be stopped or suspended.

Keywords

Inflatable Membrane Formwork, Material Characteristics, Nonlinearity, Finite Element

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着中国经济的繁荣发展和城市建设的突飞猛进, 非传统结构在公众视野中逐渐崭露头角。半球形结构作为其中的一种, 从视觉效果到结构设计都展现出了非凡的魅力, 因而受到了设计师们的极度青睐。与之相适应的模板体系, 建设者们也在寻找新型模板, 气膜模板以其造价低、施工周期短的特点得到应用与发展。

张利[1]等人结合实际案例论述了利用气膜法施工钢筋混凝土壳体结构的技术, 并总结整理出主要的施工工艺和关键的施工技术。何世钦[2]等人将气膜模板体系应用于海上浮式混凝土结构的浇筑中, 验证了浮式基础可采用多层气肋的膜结构作为主体混凝土施工的模板。气膜模板由于其自身刚度较低的特性, 在施工过程中受到外部荷载时极易产生变形, 使得混凝土结构成形后就带有一定变形, 我们称这种变形为初始缺陷。郝维平[3]等人利用有限单元法, 研究了初始几何缺陷对双曲抛物面(HP)薄壳结构性能的影响, 得出施工过程中的几何缺陷降低了薄壳结构的刚度, 削弱了结构的操作能力。

与传统模板体系的原材料相比, 膜材因其由经纱和纬纱组成这一独特的构造特点(如图 1 所示), 表现出强烈的非线性特性[4] [5]。K.L. Apedo [6]等人利用虚功原理求得充气梁的线性有限元解和非线性有限元解, 并以悬臂梁为例进行研究, 当材料性能较低时非线性特征更明显。J.G. Valdés [7]等人通过对正交各向异性膜结构进行几何非线性分析, 提出了一种基于经向纤维的三角形有限元公式, 突出了经向纤维在结构分析中的重要性。

在众多外部因素中, 风荷载对充气膜结构的影响是很明显的, Zhaoqing C [8]等人通过刚性模型的风洞试验获得球形充气膜结构上的风压数据, 参数化研究不同因素对风振响应的影响。Cheon, D.J [9]等人通过风洞试验研究了顶部中央开孔的穹顶结构的风压特性, 并与日本的风荷载规范进行比较, 考察风荷载规范的适用性。Uematsu, Y [10]等人通过风洞试验测量屋顶模型顶部和底部表面的风压分布, 研究圆顶自由屋面的设计风荷载。申跃奎[11]等人研究了考虑流固耦合与脉动风效应下不同风向角和结构参数对截椭圆形充气膜结构的风压系数的影响。本文将主要考虑水平静风荷载对气膜模板的影响。

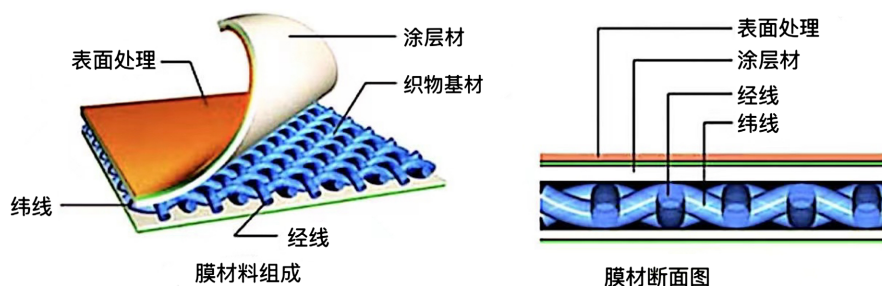


Figure 1. Structure diagram of PVC membrane
图 1. PVC 膜材构造图

2. 有限元材料模型验证

本文运用 ANSYS 软件进行有限元仿真模拟。模型单元选用只能承受面内拉力，不能承受压力的 shell41 号单元。Mehran Motevalli [12]等人提出了四种新的超弹性正交各向异性材料模型，用于纺织膜的模拟。Bin Yang [13]等人基于非线性正交各向异性材料假设，推导了 PVC 涂层织物经纬向平面内的应力 - 应变关系，并提出二阶和三阶非线性应力 - 应变方程。本文采用将实验得到的应力应变数据代入材料模型，实现膜材非线性特性的模拟。

郭晓[14][15]等人对气承式充气膜结构进行了大量的水平加载实验，结果显示结构顶点的水平位移随荷载的增大呈现明显的非线性特征，揭示了膜材的剪切刚度并非常量，而与膜内的应力水平大小相关。李绍臻[16]等人通过对 PVC 膜材剪切试验的研究给出了剪切模量随剪切应力变化的关系曲线。

如图 2 所示，通过加载绳牵引加载环将水平荷载均匀的加在充气膜结构的同一高度处，通过定滑轮将水平加载方式转化为更容易控制的竖向加载方式，然后测量气膜结构顶点的水平位移，得到荷载和水平位移的关系，如图 3 所示。

以德国的 Duraskin B6915 膜材为原型，建立如图 2 所示的等比例尺寸有限元模型，其中膜材材料参数如表 1 所示。并在同样的位置进行水平加载模拟，计算得到顶点的水平位移，并与郭晓等人的研究结果进行对比，结果如图 3 所示。

以德国的 Duraskin B6915 膜材为原型，建立如图 2 所示的等比例尺寸有限元模型，其中膜材材料参数如表 1 所示。并在同样的位置进行水平加载模拟，计算得到顶点的水平位移，并与郭晓等人的研究结果进行对比，结果如图 3 所示。

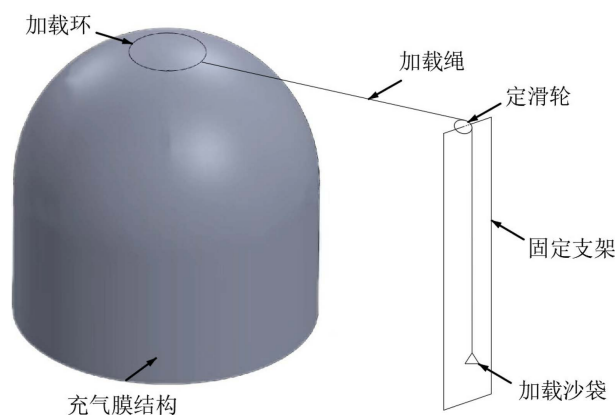


Figure 2. Horizontal loading experiment diagram
图 2. 水平加载实验示意图

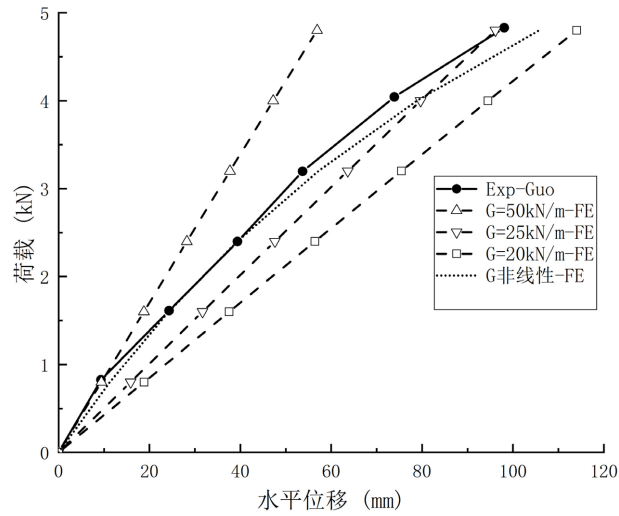


Figure 3. Comparison of horizontal loading results of inflatable membrane structures
图 3. 气膜结构水平加载的结果对比

Table 1. Membrane material parameters
表 1. 膜材材料参数

参数	Material-I	Material-II	Material-III	Material-IV
材料特性	E、G 均为线性	E 线性、G 非线性	E 非线性、G 线性	E、G 均为非线性
弹性模量 E_w	1250 kN/m	1250 kN/m	试验曲线定义	试验曲线定义
弹性模量 E_f	714 kN/m	714 kN/m	试验曲线定义	试验曲线定义
剪切模量 G_{xy}	34 kN/m	试验曲线定义	34 kN/m	试验曲线定义
泊松比	0.338	0.338	0.338	0.338
单位重量	1100 g/m ²	1100 g/m ²	1100 g/m ²	1100 g/m ²
厚度	0.9 mm	0.9 mm	0.9 mm	0.9 mm

3. 内部充气气压及风荷载的确定

3.1. 气压的确定

在确定了膜材的材料模型之后,建立半径为 3.75 m 的半球形有限元模型,作为本文的主要研究对象。如图 4 所示。

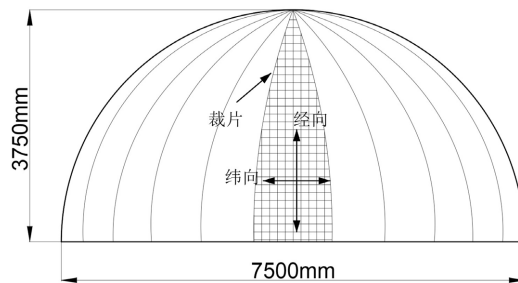


Figure 4. Inflatable membrane structure design drawing
图 4. 气膜结构设计图

PVC 膜材在实际工程中, 为避免膜材被撕裂, 常采用膜材拉伸强度的 1/5 作为使用过程中的最大应力。Duraskin B6915 膜材经向极限应力为 109.79 kN/m, 纬向极限应力 89.13 kN/m [12]。根据材料线性模型, 利用 ANSYS 软件先计算出合适的充气气压。经计算当内部气压为 8 kpa 时, 模型第一主应力最大为 21.1 kN/m, 超出正常使用过程中膜材纬向的最大允许应力。综合考虑充气加压设备可达到的压力状态, 选择 4 kpa 作为本次研究的膜内气压, 且此时膜材的弹性模量和剪切模量已进入非线性状态。

3.2. 风荷载的确定

结合工程实际, 本文选择 4~8 级(蒲福风力等级)风力作为研究参数。但在模型计算中, 直接将风速施加在模型上不太方便, 因此需将风速转换为风压等效的加在单元节点上。

根据能量守恒定律, 可将基本风速换算为基本风压, 即

$$w_0 = \frac{1}{1600} v_0^2$$

式中, w_0 为基本风压, 单位为 pa,

v_0 为基本风速, 单位为 m/s。

4~8 级风力相关参数的定义与选取见表 2。

Table 2. 4~8 wind parameters table

表 2. 4~8 级风力参数表

风力等级	名称	陆地面物特征	距地 10 m 高处相当风速(m/s)	本文选择的风速(m/s)	相对应的风压(pa)
4	和风	能吹起地面灰尘和纸张, 树的小枝摇动	5.5~7.9	7	30.625
5	清劲风	有叶的小树摇摆, 内陆的水面有小波	8.0~10.7	9	50.625
6	强风	大树枝摇动, 电线呼呼有声, 举伞困难	10.8~13.8	12	90
7	疾风	全树摇动, 迎风步行感觉不便	13.9~17.1	15	140.625
8	大风	微枝折毁, 人向前行, 感觉阻力甚大	17.2~20.7	18	202.5

在建模中, 内部气压均匀施加在模型内表面, 方向沿膜单元法向向外; 风荷载以 YOZ 平面为界均匀施加于模型左半部分, 方向沿 X 轴正方向, 荷载示意图如图 5 所示。

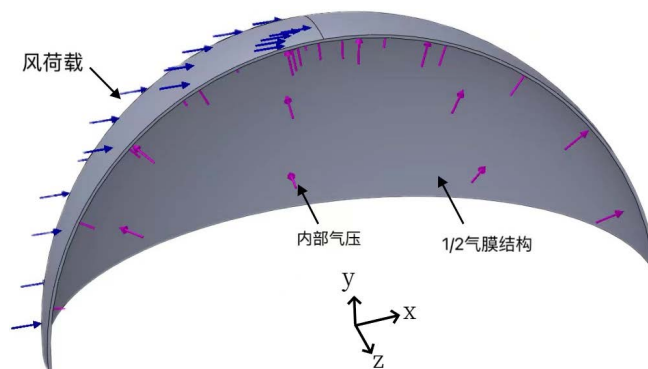


Figure 5. Load diagram

图 5. 荷载示意图

4. 水平风荷载对气膜结构变形的影响

4.1. 风荷载对顶点变形的影响

结合工程实际,考虑不同施工环境下风荷载对气膜结构的影响,求得4~8级风力影响下气膜顶点的位移结果如图6所示。

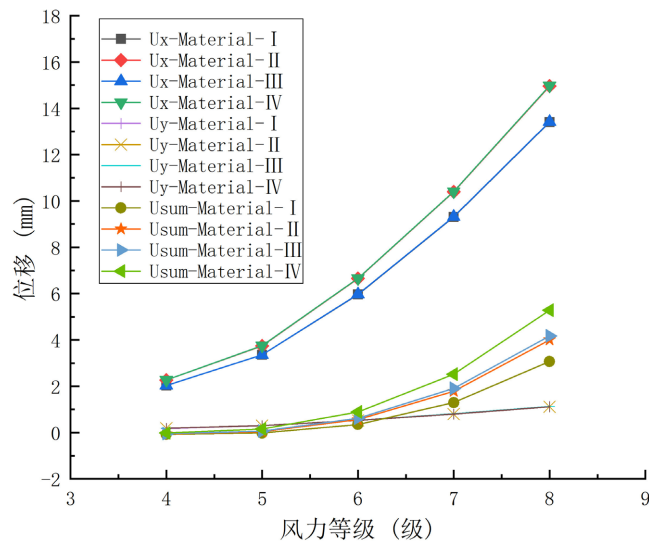


Figure 6. Vertex displacement—wind load curve

图6. 顶点位移 - 风荷载曲线

由图6可知,当水平风荷载一定时,Material-I和Material-III的水平位移数据重合,Material-II和Material-IV的水平位移数据重合,膜材的弹性模量特性对气膜顶点的水平位移影响不是很明显,但Material-II和Material-IV的水平位移数据大于Material-I和Material-III的水平位移数据,剪切模量非线性的影响大于剪切模量线性的影响;四种材料模型的竖向位移数据基本重合,说明膜材弹性模量特性和剪切模量特性对气膜顶点竖向位移的影响差异可以忽略不计。随着风荷载的增大,气膜结构的顶点位移呈现非线性的增长趋势,位移曲线的增长曲率逐渐增大,说明膜材的剪切模量随着膜内应力水平的不同表现出非线性的特征。

4.2. 风荷载对剪切模量非线性的影响

以上数值分析结果表明,风荷载作用下膜材的剪切模量是非线性变化的,为进一步研究将剪切模量按非线性考虑比按线性考虑时的效果如何,我们引入参数 λ 来表示。

$$\lambda = \frac{G_{\text{非线性的变形}} - G_{\text{线性的变形}}}{G_{\text{线性的变形}}} \times 100\%$$

分别计算不同风荷载作用下顶点处的 λ 值,得到如图7的结果。

由图7可以清晰的看出,随着风荷载的增大,气膜结构顶点处的 λ 值逐渐降低,说明当外部荷载较低时,把剪切模量按非线性考虑得到的结果更加合理。

4.3. 风荷载对整体变形的影响

从图6可以得出随着风荷载的逐渐增大,气膜结构顶点的变形也随之增大。为了更好的反应风荷载对结构整体变形的影响,提取风力等级为6级时气膜结构的整体变形和应力分布,如图8,图9所示。

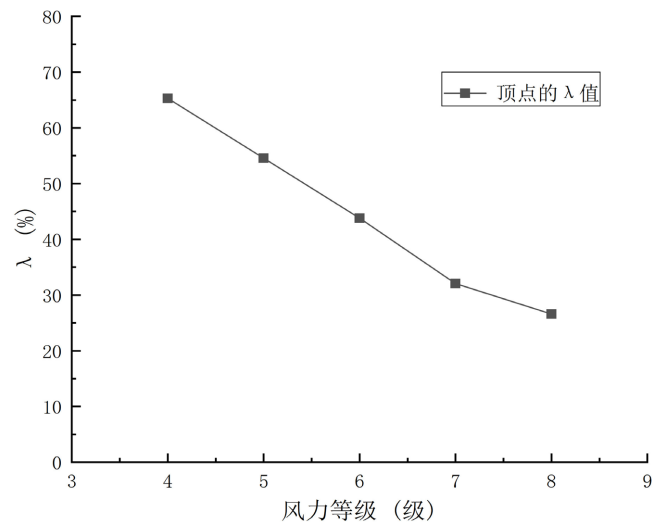


Figure 7. Curve of vertex λ value of wind load
图 7. 顶点 λ 值随风荷载变化曲线

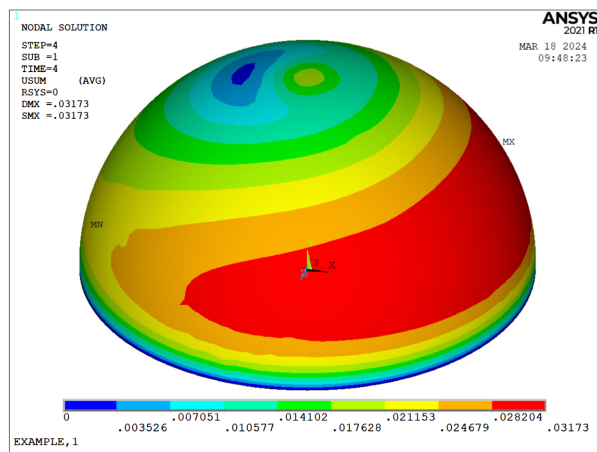


Figure 8. Overall displacement diagram of inflatable membrane structure at wind level 6 (Material-I)
图 8. 风力 6 级时气膜结构整体位移图(Material-I)

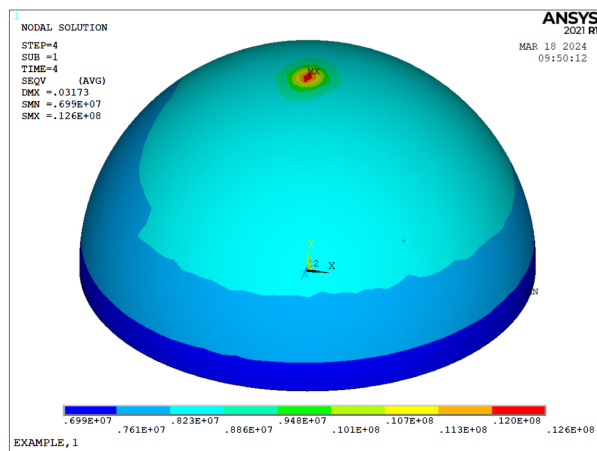


Figure 9. Effect diagram of inflatable membrane structure at wind force level 6 (Material-I)
图 9. 风力 6 级时气膜结构等效应力图(Material-I)

由图8和图9可以清晰的看出风荷载使气膜结构出现局部凹陷区域,且容易在顶点处形成应力集中。为了更加直观的观察不同位置处的变形差异,提取不同风力等级下XOY平面上所有节点的位移,并与原始坐标对比如图10所示。

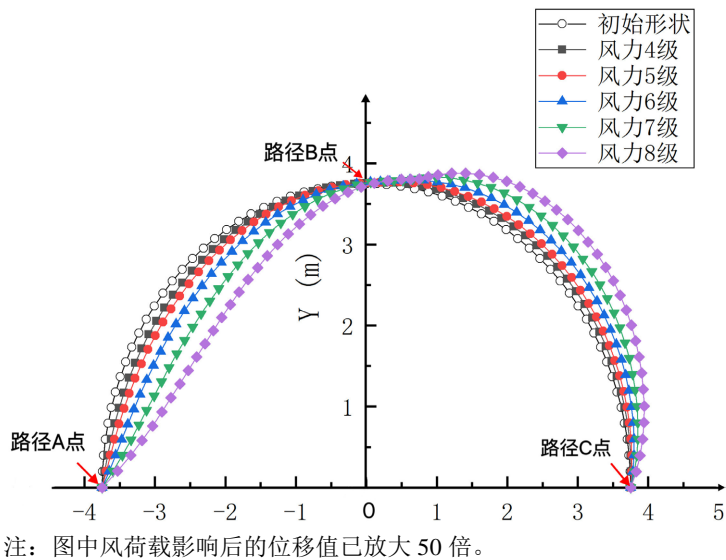
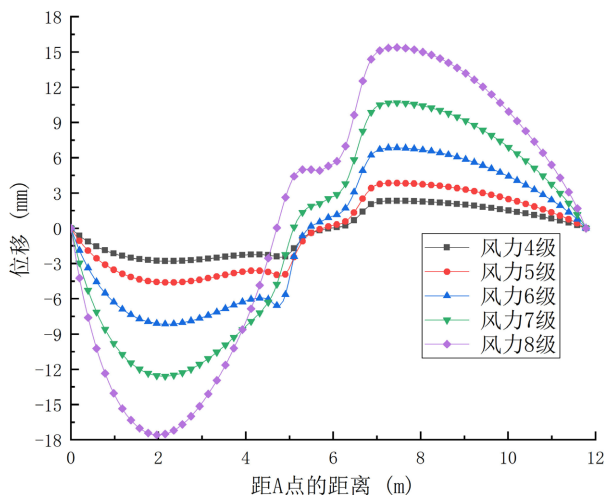


Figure 10. Displacement diagram of XOY plane under different wind levels
图 10. 不同风力等级下 XOY 平面的位移图

图10可以清晰的看出随着风荷载的增大,气膜结构的变形逐渐增大,整体线形也不再接近圆弧状,且顶点位置会有明显偏移。但图中的位移值与模型尺寸之间数量级相差太大,会掩盖掉风荷载对不同位置处的影响差异,故沿经线方向定义曲线路径ABC,提取路径上距A点不同距离的点的位移数据和应力数据,如图11,图12所示。

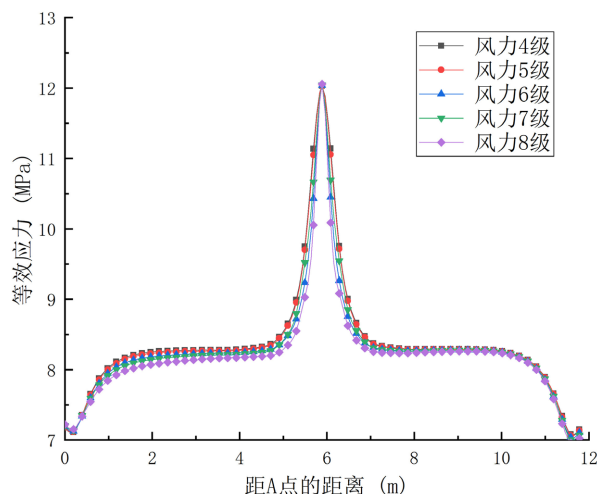


注: 曲线路径 ABC 全长 11.78 m, 图中位移数据为负代表向膜内侧偏移, 位移数据为正代表向膜外侧偏移。

Figure 11. The displacement curve on the path ABC under different wind level
图 11. 不同风力等级下路径 ABC 上的位移曲线

由图11可知,风力等级越大,气膜结构线形相较于初始位置的偏离值也越大;不同风力等级下,气

膜结构发生最大变形的区域是大致相同的,但当外部风荷载较小时,易形成局部凹陷区域(与图8一致),外部风荷载增大后,局部凹陷区域消失,但顶点偏移会迅速增大。



注:气膜由于其裁片制造原因容易在顶点造成应力集中,图中应力最大点为气膜顶点。

Figure 12. The equivalent stress curve on the path ABC under different wind power levels

图 12. 不同风力等级下路径 ABC 上的等效应力曲线

图 12 中能明显的看到应力集中区域,这是因为气膜结构在制作过程中膜材裁剪出的独特形状,多个膜材切片的角点在顶点处粘结,使得顶点受荷后更容易产生应力集中。从图中可以看出不同风力等级下,气膜结构的应力分布相差不大,但随着风力等级的增加,整体的等效应力略有减小,具体原因还有待进一步研究。

5. 结论和建议

为研究风荷载作用下气膜模板的变形,本文利用 ANSYS 软件进行参数化建模,数值模拟当剪切模量为非线性时,4~6 级风荷载作用下气膜结构的变形和应力分布,得出以下结论和施工建议:

1) 气膜结构受水平外荷载作用时,剪切模量不能看做常量处理,利用剪切实验得到的剪应力-剪应变变曲线来定义剪切模量的方法可行。

2) 当水平外荷载越小时,越不能忽略剪切模量非线性对结构变形的影响;外荷载对气膜结构等效应力分布的差异影响不是很大,但会形成应力集中区域。

3) 风荷载作用下,在迎风区易形成局部凹陷,随着风荷载的增大,凹陷区域会逐渐明显,当风荷载足够大时,凹陷区会消失,但顶点偏差会迅速增大,结构外形也不再接近球面。

4) 当所处施工环境的风力等级较小(6 级以下)时,需考虑在易形成凹陷区的位置处做加固处理;当风力等级很大时(7 级以上),为防止结果变形过大,影响后期使用,则需停止施工,等风力降到 6 级后即可继续施工。

本文主要研究了外部风荷载对气膜结构变形的影响,当其作为模板体系时,会将这部分变形传递给以此为支撑成形的混凝土结构,这样混凝土结构便带有初始缺陷,对质量和使用寿命都会大打折扣。那么初始缺陷对混凝土结构的可靠性研究,便成为接下来研究工作的重要方向之一。

参考文献

- [1] 张利, 吴赞. 气膜法施工钢筋混凝土薄壳结构技术[J]. 煤炭工程, 2019, 51(8): 48-51.

- [2] 何世钦, 李金禹, 王辉, 等. 充气膜结构模板体系在浮式结构混凝土浇筑中的应用[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(10): 26-30.
- [3] 郝维平, 张国发, 赵霄, 等. 几何缺陷对 HP 薄壳性能的影响[J]. 低温建筑技术, 2012, 34(2): 35-37.
- [4] Thomas, J. and Bloch, A. (2016) Non Linear Behaviour of an Inflatable Beam and Limit States. *Procedia Engineering*, **155**, 398-406. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.043>
- [5] 于沁灵, 龚景海. 涂层织物类膜材的力学性能及其对结构的影响[D]: [硕士或学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [6] Apedo, K.L., Ronel, S., Jacquelin, E., Bennani, A. and Massenzio, M. (2010) Nonlinear Finite Element Analysis of Inflatable Beams Made from Orthotropic Woven Fabric. *International Journal of Solids and Structures*, **47**, 2017-2033. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.03.030>
- [7] Valdés, J.G., Miquel, J. and Oñate, E. (2009) Nonlinear Finite Element Analysis of Orthotropic and Prestressed Membrane Structures. *Finite Elements in Analysis and Design*, **45**, 395-405. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2008.11.008>
- [8] Chen, Z., Wei, C., Li, Z., Zeng, C., Zhao, J., Hong, N., *et al.* (2022) Wind-induced Response Characteristics and Equivalent Static Wind-Resistant Design Method of Spherical Inflatable Membrane Structures. *Buildings*, **12**, Article 1611. <https://doi.org/10.3390/buildings12101611>
- [9] Cheon, D., Kim, Y., Lee, J. and Yoon, S. (2021) Experimental Investigation of Wind Pressure Characteristics for Cladding of Dome Roofs. *Materials*, **14**, Article 5266. <https://doi.org/10.3390/ma14185266>
- [10] Uematsu, Y. and Yamamura, R. (2018) Experimental Study of Wind Loads on Domed Free Roofs. *Proceedings of the XV Conference of the Italian Association for Wind Engineering*, Naples, 9-12 September 2018, 716-729.
- [11] 申跃奎, 李洋, 刘晨迪, 等. 考虑流固耦合与脉动风效应的截椭球形充气膜结构的风压分布研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(6): 120-126.
- [12] Motevalli, M., Uhlemann, J., Stranghöner, N. and Balzani, D. (2019) Geometrically Nonlinear Simulation of Textile Membrane Structures Based on Orthotropic Hyperelastic Energy Functions. *Composite Structures*, **223**, Article ID: 110908. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110908>
- [13] Yang, B., Yu, Z., Zhang, Q., Shang, Y. and Yan, Y. (2020) The Nonlinear Orthotropic Material Model Describing Biaxial Tensile Behavior of PVC Coated Fabrics. *Composite Structures*, **236**, Article ID: 111850. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111850>
- [14] 郭晓. 充气膜结构力学性能分析与试验研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [15] Guo, X., Qing, Q., Gong, J. and Zhang, L. (2018) A Modified Material Model Describing the Load-Deflection Behavior of Air-Supported Fabric Structure with Decreasing Stress. *Thin-Walled Structures*, **124**, 384-391. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.12.025>
- [16] 李绍臻, 郭晓, 杨斌. PVC 膜材剪切模量非线性研究及有限元分析[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(3): 70-75.