

文章编号:1673-9469(2010)02-0016-03

耦合作用下索膜结构的风振响应分析

谭燕秋,张鹏

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:在任意拉格朗日-欧拉描述下,结合索膜结构的风振响应特点,采用流固耦合问题数值计算方法,实现了三维情况下索膜结构风场的数值模拟。结果表明:耦合作用对风压的分布形式影响不明显。在迎风面出现负压区,边缘附近风压较小;高负压区出现在迎风面的中部;中部为高正压区。耦合作用对索膜结构起抑制作用,结构的位移与应力会有所减小。

关键词:索膜结构;流固耦合;风振响应

中图分类号: TU38

文献标识码: A

Wind induced response analysis of membrane - cable structures in fluid - structure interaction

TAN Yan-qiu, ZHANG Peng

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: According to the Arbitrary Lagrangian - Eulerian(ALE) description, a numerical simulation approach for wind induced response analysis of membrane - cable structures in three dimensions has been accomplished with recent international computation techniques. The results show that the influence of coupling effect to the distribution form of wind pressure is not significant. The negative pressure occurs in the windward area, and the air pressure near the edge is smaller than other parts; the high - negative pressure occurs in the middle of the windward side and the high positive pressure in the center. The membrane - cable structure is restrained by the coupling effect, of which the displacement and stress decrease.

Key words: membrane - cable structure; fluid - structure interaction; wind induced response

近年来,索膜结构的应用得到长足发展。但该类结构跨度大、自重轻、刚度小、自振频率低,风荷载是该类结构设计中的主要控制荷载^[1]。风敏感结构具有明显的几何非线性,王广勇、薛素铎^[2]对索膜结构的风压分布情况进行了研究,结构与风场的流固耦合作用较为显著;沈世钊、武岳^[3]通过风洞实验来分析研究风与索膜结构的耦合作用。本文充分利用结构分析软件 ANSYS,实现索膜结构流固耦合的数值模拟,研究流固耦合效应时风对索膜结构风振响应规律。

1 流体运动的控制方程

在结构风工程中,风场一般可视为粘性不可压缩流场。流体运动控制方程中的动量方程表示为

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

本构方程为

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

连续方程为

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

式(1-3)中, $v_i - x_i$ 方向上的速度; μ —流体的动力粘性系数; f_i —单位质量流体受到的体积力分量; ρ —流体密度; p —压力; τ_{ij} —应力张量分量; δ_{ij} —Kronecker 符号。

在风与结构耦合作用的数值模拟中,以流体域与结构域在公共边界上的变形作为协调条件。因此,流体流动的拉格朗日描述不再适用,故引入

任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE)描述。

ALE描述下的粘性不可压缩N-S流体控制方程的动量方程变为

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + (v_j - w_j) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

式(4)中, w_j — x_j 方向上网格的运动速度。

2 结构振动的控制方程

结构振动的控制方程表示为

$$\dot{b} \left[\frac{d^2 u_i}{dt^2} + \eta \frac{d u_i}{dt} \right] = {}_0^i \tau_{ij} + f_i \quad (5)$$

$$\dot{s}_{ij} = \frac{\dot{b}}{\rho} \frac{\partial^2 x_i}{\partial x_k \partial x_k} \frac{\partial^2 x_j}{\partial x_l \partial x_l} s_{kl} \quad (6)$$

$$\dot{\tau}_{ij} = \frac{\dot{\rho}}{\rho} \frac{\partial^0 x_i}{\partial x_k \partial x_k} \frac{\partial^0 x_j}{\partial x_l \partial x_l} \tau_{kl} \quad (7)$$

式(5-7)中, u_i —结构在 t 时刻的位移分量; ρ —初始时刻的材料密度; ρ — t 时刻的材料密度; f_i — t 时刻的体力分量; η —质量比例阻尼系数; ${}_0^i \tau_{ij}$ — t 时刻的柯西应力张量分量; s_{ij} — t 时刻第二匹奥拉-柯西霍夫应力张量分量。

3 流体结构耦合算法

耦合方程可采用直接耦合法或迭代耦合法求解。迭代耦合方法比直接耦合法稳定性差,但容易通过计算机计算可用于大型复杂结构的分析,因而得到广泛应用。本文采用迭代耦合法对索膜结构流固耦合风振响应进行数值模拟。主要步骤如下:

(1)以未变形的结构作为流体的计算边界,计算流体流场,得到作用在结构表面的压力;

(2)将该压力作用于结构,使结构产生变形,根据结构的变形修改流体边界及流体网格,重新进行流体计算分析。

(3)重复迭代(1)和(2)直到流体和固体界面两次计算的的压力差达到设定的收敛标准。

4 数值模型与算例分析

利用ANSYS,对鞍形索膜结构进行流固耦合分析,考察流固耦合作用对结构动力特性的影响。

4.1 有限元模型

结构外形为正方形,对角线距离为10m,高度4m,离地4m,矢跨比2:5,结构4角点固定,4条边为柔性边索,如图1所示。膜面的厚度为1mm,初始预

张力 $\sigma = 20\text{N/cm}$,弹性模量 $E = 2.55 \times 10^8 \text{N/m}^2$,张拉刚度 $E_t = 2550\text{N/cm}$,剪切刚度 $G_t = 800\text{N/cm}$,泊松比 $\gamma = 0.3$,热膨胀系数 $\alpha = 10/^\circ\text{C}$;边索的横截面积为 0.0001m^2 ,初始预拉力 $T = 30\text{kN}$,弹性模量 $E = 1.5 \times 10^{11} \text{N/m}^2$,抗拉刚度 $EA = 3 \times 10^4 \text{kN}$ 。

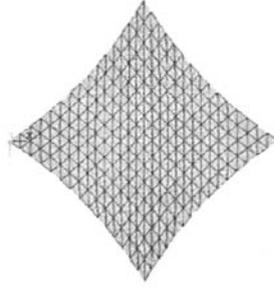


图1 索膜结构的网格图

Fig.1 Grid of cable-membrane structure

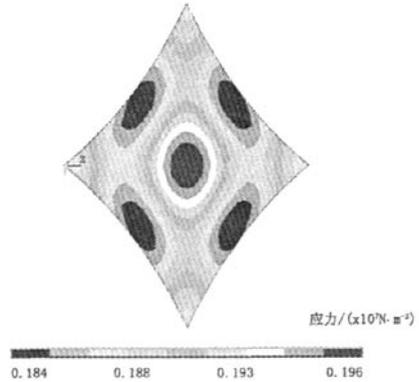


图2 索膜结构找形后的应力云图

Fig.2 Stress of cable-membrane structure after form-finding

有限元建模时,索单元采用空间铰接2节点杆单元LINK 10,膜体单元采用3节点三角形平面应力单元SHELL41。采用小弹性模量法进行初始找形,找形结果如图2所示。

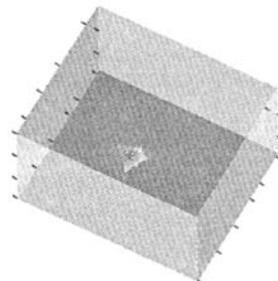


图3 风场流体域模型

Fig.3 Wind fluid model

由图2可得,找形后薄膜的初始应力范围为 $0.184 \times 10^7 \sim 0.197 \times 10^7 \text{ Pa}$,则初始预张力为 $\sigma = 18.4 \sim 19.7 \text{ N/cm}$,两者相差7%;不平衡位移仅为 0.00306 m ,空间膜面积为 46.143 m^2 ,找形的结果基本上满足要求。

4.2 风场流体域模型

风场流体域如图3所示,流体域采用FLUID142单元,流体域大小 $60 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 15 \text{ m}$,结构距入口距离 20 m ,结构距侧壁距离 10 m ,场地类型为B类,地面粗糙度指数 $\alpha = 0.16$,风向角取 0° ,入口风速为 30 m/s 。对流体域进行网格划分,采用六面体非结构网格,网格数量 6000 ,各壁面的网格大小和边界条件如表1所示。

表1 流体域的各壁面网格大小及边界条件设置

Tab.1 Wall grid size and boundary conditions set of fluid

边界	网格尺寸 /m	壁面类型
		入口风剖面: $v_x = v \times (z/10 \text{ m})^\alpha$
		湍流强度: $I = 0.1(z/z_g)^{-\alpha-0.05}$
进流面	1.5	湍流特征长度: $l = 0.1 \text{ m}$
		其中: $\alpha = 0.16, z_g = 350 \text{ m}, v = 30 \text{ m/s}$
出流面	1.5	开口
地面	1.5	无滑移壁面
侧壁/顶壁	1.5	自由滑移壁面
薄膜上面		无滑移壁面
薄膜下面	0.5	流固耦合面

4.3 计算结果与分析

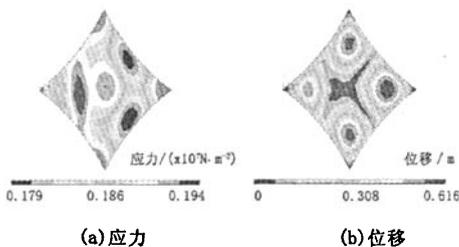


图4 耦合作用下的索膜结构的应力及位移图

Fig.4 Stress and displacement of cable membrane structure under the action of coupling

图4为耦合作用下索膜结构的应力和位移图,耦合作用下索膜结构的应力范围为 $0.179 \times 10^7 \sim 0.196 \times 10^7 \text{ N/m}^2$,索膜结构的位移最大值为 0.693 m ;图5为不考虑耦合作用下索膜结构的应力和位移图,不考虑耦合作用下应力范围为 0.180

$\times 10^7 \sim 0.197 \times 10^7 \text{ N/m}^2$,索膜结构的位移最大值为 0.767 m 。

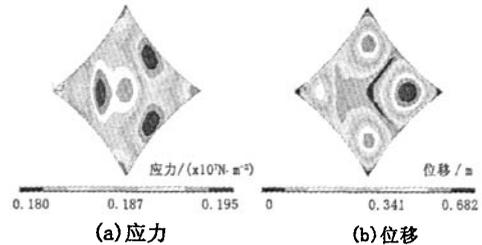


图5 不考虑耦合作用下的索膜结构的应力及位移图

Fig.5 Stress and displacement of cable-membrane structure without action of coupling

对比图4和图5知,在不考虑耦合作用和考虑耦合作用的情况下,膜面的风压分布基本一样,在迎风面出现负压区,边缘附近风压较小,高负压区出现在迎风面的中部,中部为高正压区。最大位移都出现在背风面,中部位移较小。考虑耦合作用与不考虑耦合作用相比较,位移减小9.6%,应力减小0.5%,这说明流固耦合作用对结构具有明显的抑制作用。

5 结论

1) 在不考虑耦合作用和考虑耦合作用的情况下,风压的分布形式基本一样,在迎风面出现负压区,边缘附近风压较小,高负压区出现在迎风面的中部,中部为高正压区。

2) 考虑耦合作用时相应的位移与应力较不考虑时有所减小。因此,耦合作用对结构起抑制作用,即在不考虑流固耦合作用时结构抗风设计比考虑耦合作用较安全,但是没有达到结构的最优设计。为了使结构设计更经济合理,应该考虑索膜结构的耦合作用。

参考文献:

- [1] 沈世钊,武岳.大跨度张拉结构风致动力响应研究进展[J].同济大学学报,2002,30(5):533-538.
- [2] 王广勇,薛素铎.基于流固耦合的膜结构风压系数[J].北京工业大学学报,2009,35(2):218-223.
- [3] 沈世钊,武岳.索膜结构风振响应中的气弹耦合效应研究[J].建筑钢结构进展,2006,8(2):30-36.
- [4] 张雄,陆明万,王建军.任意拉格朗日-欧拉描述法研究进展[J].计算力学学报,1997,14(1):91-102.
- [5] 周岱,李华峰.考虑流固耦合作用的索膜结构开洞与封闭条件下的风压风振模拟[J].空间结构,2008,14(2):3-7. (责任编辑 马立)