

文章编号:1673-9469(2009)01-0025-04

## 椭球面钢—混凝土组合肋壳自振特性分析

关志军<sup>1</sup>,雷光明<sup>2</sup>,常玉珍<sup>1</sup>,唐如意<sup>1</sup>

(1.西安建筑科技大学 土木工程学院,西安 710055;2.西安建筑科技大学 理学院,西安 710055)

**摘要:**采用有限元方法计算了椭球面钢—混凝土组合肋壳结构的自振特性,分析了不同矢跨比、不同长短跨比值、不同组合肋截面和不同支座条件下自振特性的规律。分析了结构的振型特征,找出了结构中刚度较弱的部位,为结构的抗震性能分析提供了参考。

**关键词:**钢—混凝土组合肋壳;自振特性;振型特征

**中图分类号:** TU393

**文献标识码:** A

### Analysis of natural vibration characteristics of ellipsoid steel - concrete composite ribbed shell

GUAN Zhi-jun<sup>1</sup>, LEI Guang-ming<sup>2</sup>, CHANG Yu-zhen<sup>1</sup>, TANG Ru-yi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The free vibration characteristic of steel - concrete composite ribbed shell is taken into account the influence of many kinds of factors such as the rise - span ratio, the ratio of length span and short span, the size of composite rib, the condition of supports and so on, by using the finite element method. The traits of modes are also analyzed, and the weaker stiffness parts of the structure are found which provide reference for the aseismic analysis of the structure.

**Key words:** steel - concrete composite ribbed shell; the free vibration characteristic; traits of modes

近20年来,我国大跨度空间结构取得了迅速的发展,空间结构形式越来越多样化。很多学者利用钢、混凝土两种材料,通过采用不同截面形式和结构形式,先后提出了混合组合网壳、板片空间、带肋局部双层网壳、拱支网壳、大跨度钢—混凝土组合薄壳屋盖等组合空间结构<sup>[1]</sup>。

钢—混凝土组合肋壳是一种新型的空间组合结构,它由U型截面钢肋和浇注于其内的混凝土肋构成组合肋,以组合肋为支架浇注混凝土薄壳,最终完成组合肋壳的施工<sup>[2]</sup>。由于在组合肋壳结构中,钢肋对其内部混凝土的约束作用有利于提高其抗压性能,钢材的材料特性大大提高了组合肋轴向受拉性能,混凝土壳对组合肋壳中的骨架—组合肋起到一定的抗失稳约束作用,两者协同工作,结构的整体刚度增大,提高了其极限承载能力。另外,屋顶承载力大,可以进行绿化,使钢

—混凝土组合肋壳可以充分发挥材料的性能,使结构受力更加合理,真正达到了合理、适用、经济的原则。本文对椭球面钢—混凝土组合肋壳在不同参数下的结构自振频率变化规律和振型特征进行研究,为结构的抗震性研究提供参考。

### 1 结构自振特性计算一般原理

了解预应力拱架结构的自振频率与振型特性是掌握该结构体系动力特性的基本途径之一。模态分析可以确定结构的固有频率和振型,固有频率和振型是承受动态载荷结构设计中的重要参数。

结构体系自振特性是指体系受到初始激励后的无阻尼自由振动特性,其振动方程为

$$[m]\{\ddot{X}\} + [k]\{X\} = \{0\} \quad (1)$$

式中 $[m]$ 、 $[k]$ 、 $\{X\}$ —体系的质量、刚度、位

移和加速度。

经变换可得:

$$\{X^*\}^T \{X^*\} = 1 \quad (2)$$

根据 Cramer 法则,该式具有非零解的必要条件为其系数矩阵行列式等于零,即

$$| [k] - \omega^2 [m] | = 0 \quad (3)$$

其解为圆频率  $\omega$ , 故称式(3)为频率方程,实际上自振圆频率  $\omega$  就是式(3)的特征值,将  $\omega$  代入式(3)得到特征向量  $X$ , 该式称为频率方程,在结构动力学中将特征向量又称为振型。若  $| [k] - \omega^2 [m] | = 0$ , 则式(3)有无穷解。定义满足  $\{X^*\}^T \{X^*\} = 1$  的特征向量  $X^*$  为主振型,满足初始条件振幅向量为

$$\{X\} = a \{X^*\}$$

$a$  由初始条件确定,则式(2)可写成

$$\{X\} = a \{X^*\} \sin(\omega t + \theta)$$

可以看出,体系的自振特性可用自振频率的值和相应的主振型表示<sup>[3]</sup>。本文采用分块法进行广义特征值的求解,得出结构体系前若干阶自振频率和振型<sup>[4]</sup>。

## 2 自振特性分析

### 2.1 计算模型

本文利用大型有限元软件 ANSYS 进行结构分析,其中用空间梁单元 beam188 模拟组合肋,用等厚曲边壳单元 shell181 模拟混凝土壳。椭球面钢-混凝土组合肋壳的肋格按经线和纬线划分,其中径向划分为9段,环向分为24段,如图1所示。

从工程实际应用角度考虑,本文取结构的长

跨  $2a$  为定值 36m,长短跨比值  $\frac{2b}{2a}$  分别为 0.6,0.7,0.8;矢跨比  $\frac{f}{2b}$  分别为 0.2,0.3,0.4,0.5。

截面的选取参照 JGJ/T22-98《钢筋混凝土薄壳结构设计规程》对带肋混凝土壳的规定,分别考虑了以下三种不同的截面尺寸,如表1所示。

表1 截面尺寸

Tab.1 Section dimension

类型	肋宽	肋高	混凝土壳厚度	钢筋厚度
	H/mm	B/mm	t/mm	t1/mm
S1	100	200	80	8
S2	150	300	80	8
S3	200	400	80	8

材料采用 C30 混凝土, Q235 钢材。对结构进行模态分析,主要研究结构的振型,以及不同失跨比、不同长短跨比值、不同组合肋截面尺寸和不同支座条件下自振特性的规律。

### 2.2 振型分析

本文给出失跨比  $f/2b$  为 0.3,长短跨比值  $2b/2a$  为 0.7,组合肋截面为 S2,周边铰接时的前八阶振型图,如图2所示。

从振型图可以看出,组合肋壳的第1阶振型为第四肋环以内壳面发生反对称的外凸和内凹;第2阶振型为第三肋环以内壳面向外凸出;第3阶和第4阶振型为第三肋环和第四肋环间的壳面发生反对称的外凸和内凹;第5阶振型为第三肋环以内的壳面发生对称的内凹;第6~8阶振型为第五肋环以内的壳面发生对称的内凹和外凸。

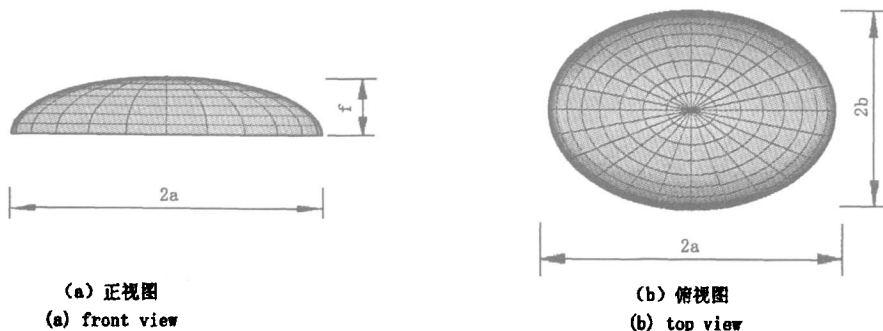


图1 钢-混凝土组合肋壳整体模型图

Fig.1 The whole model figure of composite ribbed shell

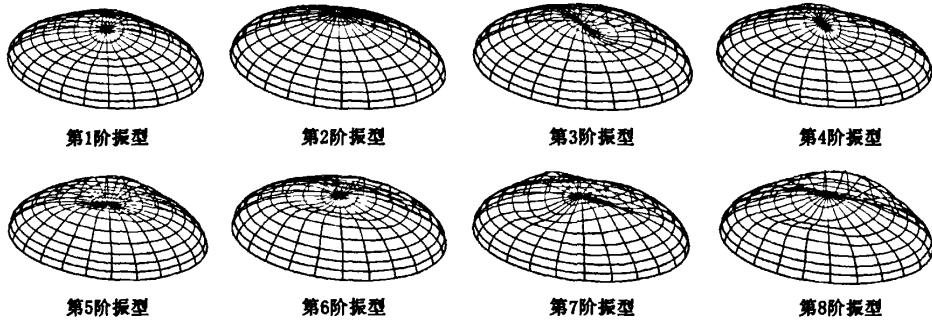


图2 椭球面钢-混凝土组合肋壳的前八阶振型图

Fig.2 The first eight vibration shape diagram of ellipsoid composite ribbed shell

表 2 不同矢跨比下的自振频率(2b/2a=0.7, 组合肋截面为 S2, 周边铰接)

Tab.2 Natural frequency under different span - high ratio

矢跨比 (f/2b)	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>	f <sub>7</sub>	f <sub>8</sub>
0.2	9.449 8	9.777 4	11.744	12.924	13.739	14.436	15.232	16.027
0.3	13.226	13.229	16.103	16.250	16.416	17.962	18.205	19.591
0.4	14.858	16.595	17.231	19.252	19.934	20.279	21.480	22.044
0.5	14.258	19.302	19.609	21.278	21.398	21.966	22.718	23.767

表 3 不同长短跨比值下的自振频率(f/2b=0.3, 组合肋截面为 S2, 周边铰接)

Tab.3 Natural frequency under different ratio of length span and short span

长短跨比值 (2b/2a)	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>	f <sub>7</sub>	f <sub>8</sub>
0.6	12.366	12.463	15.437	15.860	16.152	17.574	17.863	20.130
0.7	13.226	13.229	16.103	16.250	16.416	17.962	18.205	19.591
0.8	13.758	13.954	15.904	16.817	17.035	18.449	18.637	19.701

表 4 不同支座条件下的自振频率(f/2b=0.3, 2b/2a=0.7, 组合肋截面为 S2)

Tab.4 Natural frequency under different condition of supports

支座条件	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>	f <sub>7</sub>	f <sub>8</sub>
铰接	13.226	13.229	16.103	16.250	16.416	17.962	18.205	19.591
固接	13.228	13.304	16.473	16.473	16.734	18.240	18.634	18.634

表 5 不同组合肋截面下的自振频率(f/2b=0.3, 2b/2a=0.7, 周边铰接)

Tab.5 Natural frequency under different size of composite

组合肋截面	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>	f <sub>7</sub>	f <sub>8</sub>
S1	13.817	13.878	16.119	16.733	16.824	17.371	18.216	18.307
S2	13.226	13.229	16.103	16.250	16.416	17.962	18.205	19.591
S3	12.556	12.812	15.273	15.734	16.902	18.083	19.196	20.126

由于篇幅所限,文中没有详细给出第 9 阶以后的振型图,笔者观察分析了后面的高阶振型,发现所有的振型图均呈现第六肋环以内的壳面发生

较明显的变形,第七肋环以后的变形不是很大,经分析得知,组合肋壳在周边铰接的情况下靠外侧的壳面刚度较大,靠内侧的壳面刚度较小。因此

在以后研究椭球面钢-混凝土组合肋壳的抗震性能时应着重研究第六肋环以内壳面的抗震性能。

### 2.3 自振频率

经过对以上各种情况下的钢-混凝土组合肋壳进行计算,得到不同情况下的自振频率<sup>[5]</sup>,如表2~表5所示( $f_1 \sim f_8$ 为阶数)。

### 2.4 自振频率的参数分析

通过对计算结果的分析得出以下自振规律:

- 1) 椭球面钢-混凝土组合肋壳结构与其它形式的网壳结构一样,其频谱相当密集。
- 2) 不同矢跨比对自振特性影响较大,在相同短跨、组合肋截面及支座条件下,随着矢跨比的增大,自振频率增大,自振周期减小。
- 3) 在相同矢跨比、组合肋截面及支座条件下,短跨越大,自振频率越小,自振周期越大。
- 4) 边界条件的影响:周边刚接与周边铰接对其自振频率的影响很小。
- 5) 组合肋截面尺寸对自振频率的影响不大。

## 3 结论

经过分析椭球面钢-混凝土组合肋壳结构的振型特性,发现其第六肋环以内的壳面刚度较大,第六肋环以外的壳面刚度较小,因此在以后研究椭球面钢-混凝土组合肋壳的抗震性能时应着重研究第六肋环以内壳面的抗震性能。

讨论了不同参数下椭球面钢-混凝土组合肋壳结构的自振特性并总结了其变化规律,发现影响结构自振频率的主要因素是矢跨比和长短跨比值的大小。

### 参考文献:

- [1] 常玉珍,常玉珍,吴敏哲,等. 我国新型组合壳体结构的发展与应用[J]. 工业建筑,2006, 36(1): 602-606.
  - [2] 常玉珍. 钢-混凝土组合肋壳非线性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
  - [3] 韩青,张毅刚. 预应力拱架结构振动模态特性分析[J]. 工业建筑,2006, 36(1): 481-484.
  - [4] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
  - [5] 郭瑞林,吴培培,晏杰芳. 肋环型单层球面网壳结构的频谱特性分析[J]. 江西科学,2007, 25(4): 450-453.
- (责任编辑 刘存英)
- 
- (上接第24页)
- [12] 彭福明. FRP加固钢结构轴心受压构件的弹性稳定分析[J]. 钢结构,2005,20(3): 18-21.
  - [13] SHAAT A, FAM A. Strengthening of short HSS steel columns using FRP sheets[C]. Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Calgary, 2004. 567-570.
  - [14] 李勃. 碳纤维粘贴维护薄壁钢管的稳定性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2003.
  - [15] 卢亦焱,陈莉,高作平,等. 外粘钢板加固钢管柱承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2002, (4): 54-56.
  - [16] 陈莉. 薄壁钢管外粘钢加固研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2001.
  - [17] 卢亦焱,刘兰,陈莉. 外粘钢板加固钢管技术的数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版),2005,38(1): 112-116.
  - [18] CAMERON BLACK, NICOS MAKRIS. Ian Aiken, component testing, stability analysis and characterization of buckling-restrained unbonded braces[C]. University of California, Berkeley, PEER Report No. 2002/08, September 2002. 996-998.
  - [19] EDISON OCHOA ESCUDER O. Comparative parametric study on normal and buckling restrained steel braces (A master dissertation submitted in partial fulfillment of the requirement for the master degree in earthquake engineering) [D]. 2003.
  - [20] BROWN A P, AIKEN D I, JAFARZADEH F J. Buckling restrained braces provide the key to the seismic retrofit of the wallace f. bennett federal building [J]. Modern Steel Construction, 2001, 113: 1010-1014.
  - [21] 申波. 轴压套管构件静力稳定性能的理论及试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
  - [22] PRASAD B K. Experimental investigation of sleeved column, Proc. 33rd AIAA/ASCE Structures, Structural Dynamics and Materials Conference [C]. Dallas USA: AIAA/ASCE, 1992: 991-999.
  - [23] SRIDHARA B N. Sleeved compression member [P]. United States Patent 5175972, 1993.
  - [24] 朱文美. 钢构件稳定性检测与加固研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- (责任编辑 刘存英)

# 椭球面钢-混凝土组合肋壳自振特性分析

作者: [关志军](#), [雷光明](#), [常玉珍](#), [唐如意](#), [GUAN Zhi-jan](#), [LEI Guang-ming](#), [CHANG Yu-zhen](#), [TANG Ru-yi](#)

作者单位: [关志军, 常玉珍, 唐如意, GUAN Zhi-jan, CHANG Yu-zhen, TANG Ru-yi \(西安建筑科技大学, 土木工程学院, 西安, 710055\)](#), [雷光明, LEI Guang-ming \(西安建筑科技大学, 理学院, 西安, 710055\)](#)

刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 

英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)

年, 卷(期): 2009, 26 (1)

被引用次数: 1次

## 参考文献(5条)

1. [常玉珍](#); [吴敏哲](#); [吴敏哲](#) [我国新型组合壳体结构的发展与应用](#) [期刊论文]-[工业建筑](#) 2006 (01)
2. [常玉珍](#) [钢-混凝土组合肋壳非线性分析](#) 2007
3. [韩青](#); [张毅刚](#) [预应力拱架结构振动模态特性分析](#) [期刊论文]-[工业建筑](#) 2006 (01)
4. [王新敏](#) [ANSYS工程结构数值分析](#) 2007
5. [郭瑞林](#); [吴培培](#); [晏杰芳](#) [肋环型单层球面网壳结构的频谱特性分析](#) [期刊论文]-[江西科学](#) 2007 (04)

## 引证文献(1条)

1. [李金平](#), [邓强](#) [球面钢与混凝土组合肋壳自振特性分析](#) [期刊论文]-[甘肃科技](#) 2011 (4)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hbjzkjxyxb200901006.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200901006.aspx)