

新型空间结构论文集

SYMPOSIUMS ON NEW SPACE STRUCTURES

主 编 董石麟

副主编 沈祖炎 严 慧



浙江大学出版社

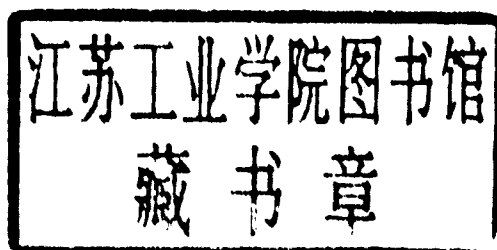
新型空间结构论文集

SYMPOSIUMS ON NEW SPACE STRUCTURES

主 编 董石麟

副主编 沈祖炎 严 慧

国家自然科学基金
城乡建设科技发展基金 联合资助项目



浙江大学出版社

(浙)新登字 10 号

内 容 提 要

本论文集是浙江大学、同济大学、东南大学、河海大学华东四高校承担国家自然科学基金和建设部科技发展基金联合资助项目“新型空间结构的强度、稳定性和动力性能的研究”的最新研究成果。主要内容有组合网架与网壳结构、斜拉与预应力网架结构、穹顶网壳与筒形网壳、板片结构与折壳结构以及张拉结构与薄膜结构等空间结构的结构形体和受力特性、强度和变形的计算方法、非线性稳定性和极限承载力分析、动力特性的分析计算以及有关工程项目的设计计算和模型试验等。

本论文集可供土建类的设计、科研、施工等部门科技人员参考和应用,也可作为高等院校土建专业高年级学生和研究生补充教材。

新型空间结构论文集

主 编 董石麟

副主编 沈祖炎 严 慧

责任编辑 俞妙送

*

浙江大学出版社出版发行

浙江省总工会杭州钟声电子技术服务部电脑排版

浙江省煤田地质局制图印刷厂印刷

*

787×1092 16 开 21.5 印张 550 千字

1994 年 11 月第 1 版 1994 年 11 月第 1 次印刷

印数 0001—2000

ISBN7-308-01599-8/TU·026

定价:20.00 元

前 言

浙江大学、同济大学、东南大学、河海大学华东四高校于 1991 年~1993 年又一次合作承担了国家自然科学基金和建设部科技发展基金联合资助项目“新型空间结构的强度、稳定性和动力性能的研究”。经四校科研人员通力协作、共同努力,三年中共完成科研报告和论文 80 篇,试验项目近 20 个。在这本《新型空间结构论文集》中共选登了其中的 43 篇论文,作为本项研究的总结。

按空间结构形式来分,本论文集的论文可分为五部分:

一、组合网架与组合网壳结构。这一部分的论文着重讨论了组合网架、网壳结构的强度和动力性能问题,也论及了组合网壳的非线性稳定问题。采用有限元法和拟夹层板法研究分析组合网架的动力特性,给出组合网架固有频率的计算方法和计算公式,对新乡百货大楼大跨度组合网架楼层作了动力分析和现场测定。采用组合结构有限元法与拟三层壳分析法系统研究了组合网壳的静动力特性,具体分析了组合球面网壳、组合扭网壳和组合双曲扁网壳的内力、挠度分布规律以及固有频率的特点,给出了组合网状扁壳固有频率的计算公式。此外,还讨论了采用广义增量法及组合结构的有限元法分析计算组合网壳的几何非线性稳定问题。

二、斜拉与预应力网架结构。这一部分的论文讨论了斜拉网架的结构形式及拉索的合理布置方案,采用有限元法对斜拉网架的静动力性能作系统的研究。结合实际工程进行斜拉网架的设计应用研究,提出斜拉网架的简化计算方法。研究了预应力网架的结构形式、施加预应力的方法和静动力特性的分析计算方法。此外,对拉索预应力组合网架的非线性性质作了分析研究,并得出便于工程应用的若干结论。

三、网壳结构。这一部分的论文着重讨论了穹顶网壳和筒形网壳的稳定性、延性和动力特性的研究。采用塑性铰理论来考虑杆件塑性变形对结构屈曲性态的影响,进行了两个单层球形网壳的弹塑性稳定试验,提出了塑性影响系数的概念。采用广义逆矩阵理论来求解网壳结构非线性刚度方程,克服了临界点处刚度矩阵奇异所引起的困难。研究了大位移带刚臂杆元来描述节点体对网壳结构稳定性的影响,推求了大位移带刚臂元的影响矩阵。研究讨论了以结构刚度矩阵的特征模态的方式引入结构几何初始缺陷,以求得网壳结构的荷载-变形平衡路径及承载能力。以力集度方程为基础,提出了寻求网壳结构的合理形体及其分析过程。结合嘉兴电厂干煤棚结构,研究了圆柱面网壳的风压分布规律并进行了风洞试验,为这类网壳结构的风荷载作用提供了可靠的风载体形系数。此外,还探讨了网壳结构的动力特性,并指出了网壳动力问题中应研究的前沿课题。

四、板片结构。这一部分论文着重讨论了板片空间结构体系及其特性和分析计算方法。结合工程应用,采用有限元法分析计算组合迭层屋面板结构。对板片结构非线性稳定性作了

分析研究并进行了模型试验。此外,对折壳结构的几何形体和力学性能作了探讨和研究。

五、张拉结构。这一部分论文总结了张拉结构的理论和计算方法的研究成果。对张拉结构的特点,形态分析的理论和方法作了论述,指出了研究张力结构的意义和应着重探讨的研究课题。

本论文集得到浙江大学夏志斌教授审校,并提出宝贵意见,在编辑出版过程中得到浙江大学空间结构研究室的教师和研究生的校阅和大力协作,仅在此一并表示衷心的感谢。

董石麟 1994年10月4日

目 录

一、组合网架与组合网壳结构

组合网架有限元分析和受力特性的研究	高博青	董石麟	(1)
组合网架动力特性的拟夹层板分析法		董石麟	(7)
组合网架动力特性的研究及电算程序的编制	林 翔	董石麟	(15)
球面组合网壳有限元分析及其受力特性的研究	胡继军	董石麟	(24)
√组合扭网壳结构的静动力特性分析	高博青	董石麟	(31)
组合网状扁壳动力特性的拟三层壳分析法		董石麟	(37)
组合双曲扁网壳结构的静力性能及动力特性研究	高博青	董石麟	(44)
√组合网壳结构几何非线性稳定分析	赵 阳	董石麟	(51)

二、斜拉与预应力网架结构

悬索网架结构合理形体及静力性能研究	肖 焱	李维滨	(60)
斜拉网架结构静力、动力特性的研究	严 慧	熊 卫	唐曹明 (67)
斜拉网架的结构特性及其设计应用研究	严 慧	唐曹明	熊 卫 (74)
预应力网架结构静、动力特性的研究	崔昌禹	严 慧	(83)
斜拉网架的简化计算	董石麟	罗尧治	(89)
拉索预应力组合网架的非线性分析	张其林	沈祖炎	李良勇 姚念亮 (93)

三、网壳结构

嘉兴电厂干煤棚双层柱面网架分析研究				
.....	钱若军	沈祖炎	费 军	钱永瑞 宋声番 (100)
102m×80m 三心圆网壳风压分布的风洞试验研究				
.....	张其林	陈扬骥	沈祖炎	宋声番 王 勇 (109)
17m×4m 双层网壳模型试验研究	陈扬骥	沈祖炎	陈学潮	张其林 (117)
方格形穹顶网壳优化设计原理	胡学仁	罗永峰		(125)
网壳结构非线性分析力学模型研究	夏绍华	钱若军		(134)
网壳结构分析中节点大位移迭加及平衡路径跟踪技术的修正	沈祖炎	罗永峰		(144)
具有缺陷单层网壳稳定性的模型试验研究与分析	黄为民	赵惠麟		(151)
√网壳结构设计临界荷载及安全系数		钱若军		(160)
√网壳结构失稳机理及分析模型的研究	钱若军	沈祖炎	夏绍华	(170)
√网壳结构非线性稳定分析中屈曲类型的判别	夏绍华	钱若军		(177)
√广义增分法在空间网壳非线性分析中的应用				
.....	胡继军	董石麟	钱海鸿	关富玲 (186)
√单层网壳结构弹塑性稳定分析	罗永峰	沈祖炎	胡学仁	(194)

√ 大型铰接穹顶网壳的几何非线性分析·····	裴永忠	严 慧	董石麟	(202)
网壳结构节点体对其承载性能的影响·····	罗永峰	沈祖炎		(210)
√ 单层网壳结构弹塑性稳定试验研究·····	罗永峰	沈祖炎	胡学仁	(219)
网壳的几何缺陷对其稳定性影响的研究·····	孙剑辉	胡学仁		(230)
求解单层扁球壳临界荷载的分散系数法·····	赵惠麟	朱建坤	周志华	(238)
√ 单层网壳的稳定性分析·····	关富玲	高博青	李 黎	(245)
√ 关于网壳结构动力稳定分析的研究现状·····	沈祖炎	叶继红		(258)
单层球面网壳地震反应分析研究·····	刘洪杰	朱继澄	肖 焱	(263)

四、板片结构

板片空间结构体系·····	钱明权	赵惠麟	赵才其	(272)
组合迭层屋面板的有限元分析·····	杨 琦	赵惠麟	宋启根	(274)
折壳结构形体及力学特性研究·····	肖 焱	韩立亚		(280)
板片空间结构体系的临界荷载计算与模型试验·····	钱明权	曹新明	赵惠麟	(290)
板片柱面壳体模型稳定性的试验研究·····	杨 琦	赵惠麟	宋启根	(294)

五、张拉结构

张力结构形状判定述评·····	钱若军			(299)
√ 张力膜结构的非线性有限元分析·····	胥传熹	钱若军		(313)
索网结构外形判定的控制点逼近法·····	钱若军	张德峰		(320)
张拉结构形体的分析与讨论·····	高振锋	沈祖炎		(330)

CONTENTS

I. COMPOSITE GRID STRUCTURES

ANALYSIS OF FINITE ELEMENT AND STUDY OF MECHANICAL BEHAVIOUR OF COMPOSITE SPACE TRUSS	Gao Boqing Dong Shilin (1)
AN ANALYSIS OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE SPACE TRUSS BY SANDWICH PLATE ANALOGY METHOD	Dong Shilin (7)
RESEARCH ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE SPACE GRID STRUCTURES AND DEVELOPMENT OF CORRESPONDING COMPUTER PROGRAM	Lin Xiang Dong Shilin (15)
FINITE ELEMENT METHOD ANALYSIS OF COMPOSITE LATTICED SPHERICAL SHELL AND A STUDY ON ITS STATIC BEHAVIOUR	
.....	Hu Jijun Dong Shilin (24)
ANALYSIS OF STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE HYPERBOLIC PARABOLOID LATTICED SHELLS	Gao Boqing Dong Shilin (31)
AN ANALYSIS OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE FLAT LATTICED SHELL BY ANALOGY METHOD OF TRIPLE-LAYER SHELL	
.....	Dong Shilin (37)
STUDY OF STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE DOUBLE CURVED FLAT LATTICED SHELLS	Gao Boqing Dong Shilin (44)
THE GEOMETRICALLY NONLINEAR STABILITY ANALYSIS OF THE COMPOSITE RETICULATED SHELL	Zhao Yang Dong Shilin (51)

II. CABLE-STAYED AND PRESTRESSED SPACE GRIDS

THE REASONABLE FORM AND STATIC CHARACTERISTICS STUDY OF THE CABLE-SUSPENDED SPACE TRUSS	Xiao Chi Li Weibin (60)
A STUDY ON THE STATIC AND DYNAMIC BEHAVIOUR OF THE CABLE-STAYED SPACE GRIDS	Yan Hui Xiong Wei Tang Caoming (67)
STUDIES ON STRUCTURAL BEHAVIOUR AND DESIGN APPLICATION OF THE CABLE-STAYED SPACE GRIDS	Yan Hui Tang Caoming Xiong Wei (74)
A STUDY ON THE STATIC AND DYNAMIC BEHAVIOUR OF THE PRESTRESSED SPACE GRIDS	Cui Changyu Yan Hui (83)
A SIMPLIFIED METHOD OF CABLE-STAYED SPACE TRUSS ANALYSIS	
.....	Dong Shilin Luo Yaozhi (89)
NONLINEAR ANALYSIS OF CABLE PRESTRESSED COMPOSITE LATTICED	

TRUSSES Zhang Qilin Shen Zuyan Li Liangyoug Yao Nianliang (93)

III. RETICULATED SHELL STRUCTURES

ANALYSIS AND DESIGN OF A DOUBLE-LAYER BARREL VAULT WITH A LARGE SPAN (100)

..... Qian Ruojun Shen Zuyan Fei Jun Qian Yongrui Song Shengfan (100)
EXPERIMENT ON THE WIND PRESSURE DISTRIBUTION ON A THREE-CENTERED CIRCULAR LATTICED SHELL WITH 102m×80m SIZES

..... Zhang Qilin Chen Yangji Shen Zuyan Song Shengfan Wang Yong (109)
THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON A 17m×4m MODEL OF DOUBLE-LAYER LATTICED DOME

..... Chen Yangji Shen Zuyan Chen Xuechao Zhang Qilin (117)
OPTIMAL DESIGN CONCEPTION OF GRID DOMES IN PRACTICE

..... Hu Xueren Luo Yongfeng (125)
A STUDY ON THE NONLINEAR MECHANICAL MODEL OF RETICULATED SHELLS Xia Shaohua Qian Ruojun (134)

UPDATING LARGE ROTATIONS OF SPACE JOINTS AND REVISION TECHNIQUE FOR TRACING THE EQUILIBRIUM PATH IN ANALYSIS OF RETICULATED SHELLS Shen Zuyan Luo Yongfeng (144)

EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS ON THE STABILITY OF SINGLE LAYER LATTICE DOME MODELS WITH INITIAL IMPERFECTIONS

..... Huang Weimin Zhao Huilin (151)
THE DESIGN CRITICAL LOAD AND FACTOR OF SAFETY OF RETICULATED SHELLS Qian Ruojun (160)

AN INVESTIGATION ON NONLINEAR ANALYTICAL MODEL OF RETICULATED SHELLS Qian Ruojun Shen Zuyan Xia Shaohua (170)

THE ESTIMATION OF BUCKLING TYPE IN NONLINEAR STABILITY ANALYSIS OF RETICULATED SHELLS Xia Shaohua Qian Ruojun (177)

NONLINEAR ANALYSIS OF RETICULATED SHELL BY THE GENERALIZED INCREMENTAL METHOD

..... Hu Jijun Dong Shilin Qian Haihong Guan Fuling (186)
ELASTO-PLASTIC STABILITY ANALYSIS OF SINGLE LAYER RETICULATED SHELLS Luo Yongfeng Shen Zuyan Hu Xueren (194)

GEOMETRICAL NONLINEAR ANALYSIS OF LARGE PIN-CONNECTED BRACED DOME RETICULATED SHELLS Pei Yongzhong Yan hui Dong Shilin (202)

THE EFFECTS OF THE JOINT SIZE OF RETICULATED SHELLS ON ITS LOAD CAPACITY Luo Yongfeng Shen Zuyan (210)

EXPERIMENTAL STUDY OF ELASTO-PLASTIC STABILITY OF SINGLE LAYER RETICULATED SHELLS Luo Yongfeng Shen Zuyan Hu Xueren (219)

AN INVESTIGATION ON THE BUCKLING OF LATTICED SHELL STRUCTURES WITH GEOMETRICAL IMPERFECTIONS	Sun Jianhui Hu Xueren (230)
MULTI-FACTOR METHOD FOR EVALUATION OF CRITICAL LOADS OF SINGLE—LAYER SHALLOW BRACED DOMES	
..... Zhao huilin Zhu Jiankun Zhou Zhihua (238)	
STABILITY ANALYSIS OF SINGLE—LAYER LATTICED SHELL	
..... Guan fuling Gao Boqing Li Li (245)	
THE CURRENT STATE ABOUT DYNAMIC STABILITY ANALYSIS OF RETICULATED SHELLS	Shen Zuyan Ye Jihong (258)
DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF SINGLE LAYER SPHERICAL RETICULATED DOMES	Liu Hongjie Zhu Jichen Xiao Chi (263)

IV. SHEET—SPACE STRUCTURES

SHEET—SPACE STRUCTURE SYSTEM	
..... Qian Mingquan Zhao Huilin Zhao Caiqi (272)	
FINITE ELEMENT ANALYSIS OF COMBINED LAMINATE ROOF PLATE	
..... Yang Qi Zhao Hunlin Song Qigeng (274)	
THE FORM AND STATIC CHARACTERISTICS STUDY OF FOLDED SHELL STRUCTURE	Xiao Chi Han Liya (280)
ANALYSIS AND EXPERIMENTAL STUDY ON THE CRITICAL LOAD OF THE SHEET—SPACE STRUCTURE SYSTEM	
..... Qian Mingquan Zhao Huilin Cao Xinming (290)	
EXPERIMENTAL STUDY ON THE STABILITY OF THE COMPOSITE BARREL VAULT MODEL	Yang Qi Zhao Huilin Song Qigeng (294)

V. TENSION STRUCTURES

A REVIEW ON FORM FINDING OF TENSION STRUCTURES	
..... Qian Ruojun (299)	
NONLINEAR FEM ANALYSIS OF MEMBRANE STRUCTURES	
..... Xu Chuanxi Qian Ruojun (313)	
AN APPROACH OF CONTROL POINTS FOR FORM FINDING OF REINFORCED CABLE NETS	Qian Ruojun Zhang Defeng (320)
ANALYSIS AND DISCUSSION OF SHAPE OF TENSION STRUCTURES	
..... Gao Zhenfeng Shen Zuyan (330)	

组合网架有限元分析和受力特性的研究

高博青 董石麟

(浙江大学)

提 要 本文对组合网架的发展作了简单回顾,给出用有限元分析组合网架的基本步骤,编制专门计算组合网架的程序。该程序具有下弦和腹杆满应力设计及常规组合网架前处理功能。采用本文编制的程序对算例作了分析,并与简化计算结果进行比较,分析肋的偏心和边界条件对结构内力和变形的影响。

关键词 组合网架 有限元分析 受力特性

一、概 述

组合网架是一种较新颖的结构,这种结构在 60 年代就已提出[1],近十几年来得到了迅速发展,并且在工程中得到广泛应用[2]。然而组合网架专用程序至今仍是空白,对组合网架的板、肋受力特点,边界条件对结构内力位移等影响的研究还不够深入。基于上述情况,本文按有限元法编制了计算组合网架专用程序,并利用该程序对这种组合结构的受力特性作了较深入的分析。

二、计算理论

组合网架用板壳元、梁元、杆元等单元组合的组合结构有限元法来分析。其中腹杆、下弦采用铰接杆系,上弦肋和板按刚接计算。整体坐标取在板的中面上,并符合右手法则。兹以板的节点位移表示梁及腹杆交汇点的位移,设肋的中和轴与板的中面之间的垂直距离为 h ,采用平截面假定,则板的节点位移 $\{\delta_c\}_p$ 与梁的节点位移 $\{\delta_c\}_l$ 的关系可由下式得出:

$$\{\delta_c\}_l = [G]_l \{\delta_c\}_p \quad (1)$$

$$[G]_l = \begin{bmatrix} \beta & 0 \\ 0 & \beta \end{bmatrix}$$

$$[\beta] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -h & 0 \\ 0 & 1 & 0 & h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

而腹杆交汇点的位移 $\{\delta_e\}_f$ 也可用板的节点位移表示,即

$$\{\delta_e\}_f = [G]_f \{\delta_e\}_p \quad (2)$$

其中

$$[G]_f = \begin{bmatrix} \beta & & & 0 \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ 0 & & & 1 \end{bmatrix}$$

而 $[\beta]$ 中的 h 用腹杆交汇点与板中面的偏心 h' 代替。

在整体坐标系下各单元的刚度矩阵、内力矩阵以及局部坐标系下的杆端力的表达式简述如下。

三角形板元平面应力单元刚度矩阵 $[K]_p^b$, 弯曲刚度矩阵 $[K]_w^b$, 平面内力矩阵 $[S]_p$, 弯曲内力矩阵 $[S]_w$ 分别为

$$[K]_p^b = [B]^T [D] [B] t A \quad (3)$$

$$[K]_w^b = \frac{1}{64 A^3} [T]^T [C]^T [I] [C] [T] \quad (4)$$

$$[S]_p = [D] [B] t \quad (5)$$

$$[S]_w = \frac{t^3}{48 A^3} [D] [H] [C] [T] \quad (6)$$

以上四式中, A 是三角形单元的面积; t 是三角形板的厚度; $[D]$ 为平面应力弹性矩阵; $[B]$, $[H]$, $[T]$, $[C]$, $[I]$ 可参见文献[3]。

梁单元刚度矩阵 $[K]^l$ 、杆端力矩阵 $[F_e]^l$ 为

$$[K]^l = [G]^T [L_e]^T [K_e]^l [L_e] [G] \quad (7)$$

$$[F_e]^l = [K_e]^l [L_e] [G] \{\delta_e\}_p \quad (8)$$

式(7), (8)中, $[K_e]^l$ 为梁单元在局部坐标系下的单刚, $[L_e]$ 为局部坐标与整体坐标的转换矩阵。

腹杆单元刚度矩阵 $[K]^f$ 、杆端力矩阵 $[F_e]^f$ 为

$$[K]^f = [G]^T [L_f]^T [K_e]^f [L_f] [G] \quad (9)$$

$$[F_e]^f = [K_e]^f [L_f] [G] \{\delta_e\}_f \quad (10)$$

上两式中, $[K_e]^f$ 为腹杆在局部坐标系下的单刚; 为 9×9 矩阵, $[L_f]$ 为局部坐标与整体坐标的转换矩阵。

下弦杆单元刚度矩阵 $[K]^x$ 、杆端力矩阵 $[F_e]^x$ 为

$$[K]^x = [L_x]^T [K_e]^x [L_x] \quad (11)$$

$$\{F_e\}^r = [K_e]^r [L_r] \{\delta_e\}_r \quad (12)$$

式(11), (12) 中, $[K_e]^r$ 为下弦杆在局部坐标系下的单刚, 而 $[L_r]$ 为转换矩阵。

有了各单元在整体坐标下的刚度矩阵, 根据边界条件, 按“对号入座”原则组集总刚, 通过求解、回代、计算即可得到各节位移及各单元的内力值。

组合网架是一种较为复杂的结构, 本文编制程序中采用了一维变带宽分块求解的方法, 可在微机上计算较大跨度的组合网架。本程序留有接口, 可方便灵活地对程序进行维护和改进。对常规组合网架, 本程序还配有前处理库, 使输入信息得到大大简化。

三、有限元法与简化计算法的计算结果比较

将上弦板通过能量等代原理, 以杆系等代的组合网架简化计算法是 1985 年提出的^[4]。目前国内绝大多数组合网架结构工程均采用这一方法设计计算。下面通过一个具体算例, 对按简化计算方法及本文有限元法分析计算结果作一比较。

某结构为一 24m×24m 正方四角锥组合网架。下弦轴线至上弦平板的中面高度为 1.80m, 板面均布荷载(包括自重)3.53kN/m²。分析时按不计力矩的等代节点荷载计算。腹杆采用 $\varnothing 60 \times 3.5$ 钢管, 并交于正交正放肋的形心。下弦分别采用 18 根 $\varnothing 89 \times 4.0$, 14 根 $\varnothing 76 \times 4.0$, 18 根 $\varnothing 60 \times 3.5$ 钢管。并按跨中配置大钢管, 边缘配置小钢管的对称配管原则。钢材弹性模量为 206N/mm²。上弦正放预制带肋板的边长为 2.4m, 板厚为 3cm。安装结束并灌缝后, 正交正放肋高 13cm, 宽 17cm, 斜放肋高 7cm, 宽 6cm, 肋高均不计入板的厚度。混凝土弹性模量 29.4N/mm², 泊松比 0.1667。结构取 1/4 按周边简支第一类边界条件(即只有竖向约束)计算, 每块上弦预制板按斜交肋划分成四个三角形单元计算。

表 1 给出了用有限元法和简化计算法所得的上弦平板最大平面正应力, 最大平面剪应力, 腹杆的最大拉力, 最大压力, 下弦杆最大拉力, 说明二种方法的结果甚为相符。

结构内力表

表 1

方 法 \ 内 力	最大平面正应力	最大平面剪应力	最大腹杆压力	最大下弦拉力
简化方法	-52.0 N/mm	13.7 N/mm	-32.0 kN	194 kN
有限元法	-49.1 N/mm	15.4 N/mm	-33.0 kN	195 kN

本文还对如下四种情况作了计算:

- (1) 简化计算方法, 周边简支, 切向不约束(情况 0)。
- (2) 有限元法, 肋、腹杆偏心为零, 周边简支, 切向不约束(情况 I)。
- (3) 有限元法, 肋、腹杆偏心不为零, 周边简支, 切向不约束(情况 II)。
- (4) 有限元法, 肋、腹杆偏心为零, 周边简支, 切向约束(情况 III)。

四、板和肋的弯曲内力和挠度

由有限元计算结果表明, 组合网架上弦平板具有多点支承连接板的特性。图 2 示出了沿斜对角线方向板的弯矩 M_x 的变化规律。对于正交斜放肋, 其弯曲变形具有多点支承连续梁

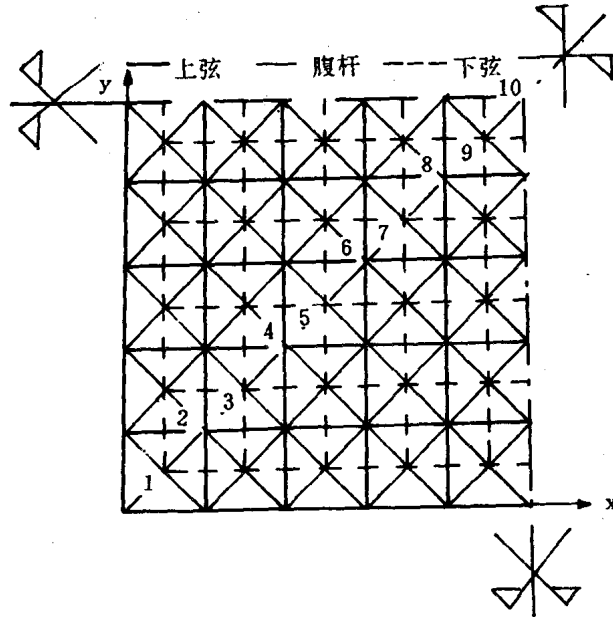


图1 组合网架平面图

的性质。图3给出的是沿斜对角线方向梁的弯矩 M_1 的变化规律。这表明板和肋具有明显的局部弯曲的特性。图4是沿斜对角线方向的挠度变化规律,从挠度曲线还可明显看出具有局部挠度的特点。

上弦平板平面内力由平板的局部弯曲内力控制。在常规的板肋尺寸下,最大局部弯曲内

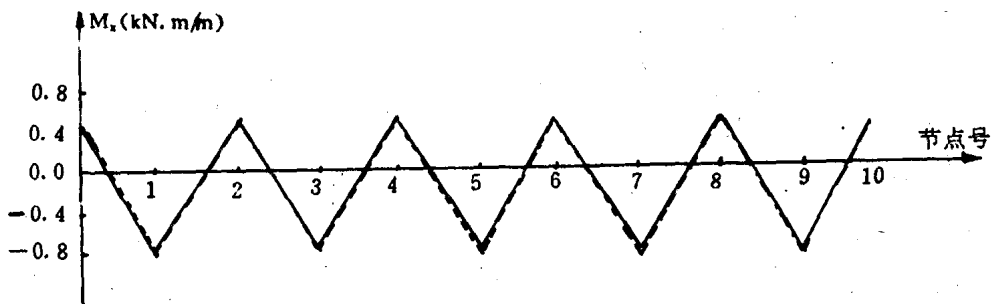


图2 沿斜对角线方向板弯矩图

力是最大平面内力的3倍左右。对于不计偏心的斜交肋,其弯曲应力远小于轴力应力。

五、肋和腹杆偏心的影响

计算表明,增加偏心将使挠度有所减小,但不会很明显,下弦及腹杆内力也将有一定的变化,而上弦肋由于偏心的影响,将会改变边缘肋的内力符号,轴力明显地由受压变为受拉,而弯曲应力会明显增大。由于考虑了肋和腹杆的偏心,肋的轴压力减小,从而使平板的平面轴力增大,边缘处更为显著,可以达到几倍的量级,而平板的平面剪力变化较小。

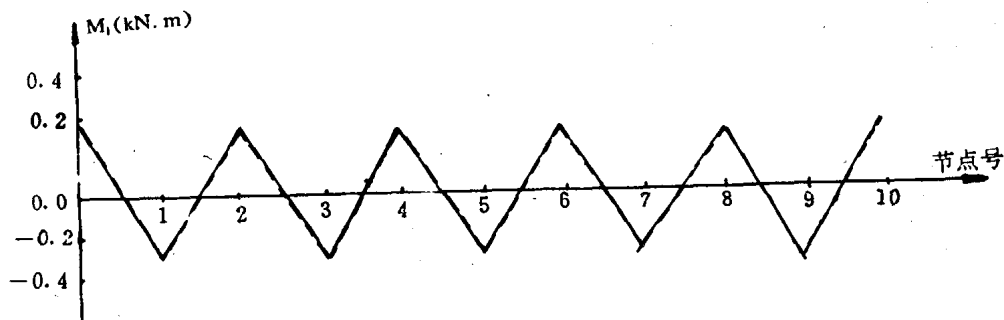


图3 沿斜对角线方向斜交肋的弯矩图

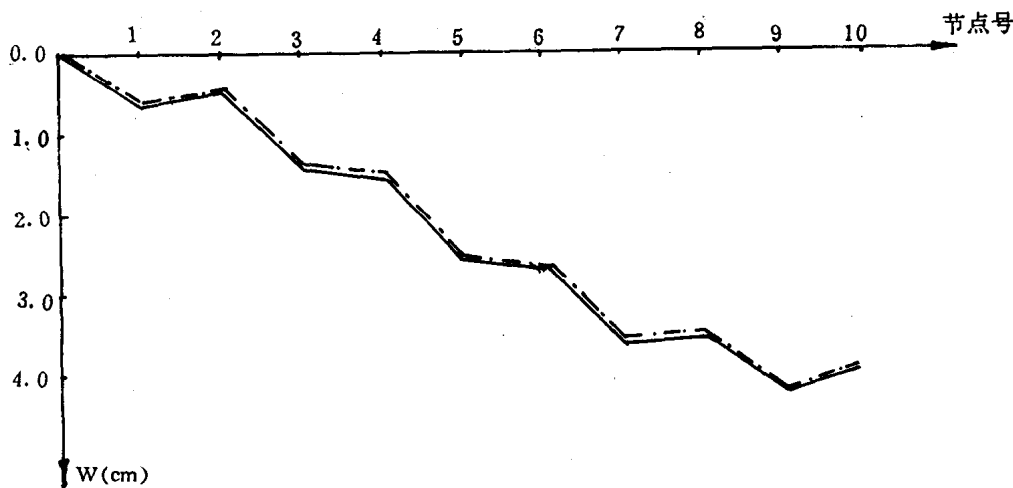


图4 沿斜对角线方向上弦节点挠度

六、 边界条件对结构的影响

从计算结果看,解 I 和解 II 的挠度无多大差别,说明边界切向是否约束对挠度影响甚微;下弦内力也基本相等,而腹杆内力有所差别,但一般也在 5% 以内。对于上弦肋,由于结构边界切向约束,此时边界上的正放肋轴力为零,而在对称面上的轴力相差仍不明显。对于板中平面内力,边缘的平面剪力将明显增大,而跨中的平面轴力会有所减小。对与斜放四角锥网架用拟夹层板计算结果有类似性。由此可见,边界条件对角部剪力甚为敏感。

七、结 论

1. 简化计算方法作为一种实用方法是可行的,其精度能满足工程要求,但该方法不能考虑板肋及腹杆的偏心影响。

2. 按本文计算表明,上弦板的应力由局部弯曲应力控制,其最大值可达到平面应力的3倍左右。

3. 肋的偏心,对肋本身轴向内力影响甚大,在边缘部分,组合网架中的肋会出现受拉现象。对平板的平面内力约有10%的影响,而对板的局部弯曲内力没有明显影响。

4. 结构的边界条件,对边界板中的平面剪应力有较大的影响,而正应力影响不甚明显,对腹杆、下弦杆内力影响甚微。

5. 有限元法作为现代计算方法,用来分析这种较为复杂的组合网架结构是有效的。

参 考 文 献

- [1] H. Castillo, A Space Frame Construction with Steel and Reinforced Concrete — the “Tridilosa” Spatial Structure, Space Structure, 1966
- [2] 董石麟:“组合网架的发展与应用——兼述结构形式、计算、构造及施工”,《建筑结构》,第6期,1990
- [3] 华东水利学院,《弹性力学问题的有限元法》,水利出版社,1982
- [4] 董石麟,杨永革:“网架平板组合结构的简化算法(上)、(下)”,《建筑结构学报》,第4,5期,1985。

ANALYSIS OF FINITE ELEMENT AND STUDY OF MECHANICAL BEHAVIOUR OF COMPOSITE SPACE TRUSS

Gao Boqing Dong Shilin
(Zhejiang University)

Abstract A brief review about the development of composite space trusses is made. Basic steps for analysing the composite space trusses by FEM are given and a special computer program is developed. The program can be used in design of the bottom chords and web members of the truss by full-stress method and possesses the pre-handling function for common composite space truss. An numerical example by this program is analysed, and the results are compared with that by the simplified method. Furthermore, the effects of eccentricities of ribs and boundary conditions of the truss on the internal forces and deformations of the structure are studied.

Key words composite space grids FEM analysis mechanical behaviour

组合网架动力特性的拟夹层板分析法

董石麟

(浙江大学)

提 要 本文按连续化的途径,采用拟夹层板法探讨了组合网架结构的动力特性。文中给出考虑横向剪切变形组合网架固有频率的计算公式。计算表明,在计算固有频率时,组合网架剪切变形的影响不可忽略。

关键词 组合网架 拟夹层板法 动力特性 固有频率 剪切变形

一、概 述

组合网架是一种钢结构与钢筋混凝土结构组合的空间结构。它以钢筋混凝土带肋平板代替一般钢网架的上弦杆,以钢和钢筋混凝土的组合节点代替钢上弦节点,形成一种下部是钢结构与上部是钢筋混凝土结构组合的新型空间结构,也是一种杆系、梁系、板系共同工作的空间结构体系。这种组合网架具有结构刚度大、受力性能好、结构的承重和围护功能合二而一,可充分发挥钢材和混凝土两种不同材料的强度优势等特点。

我国自 1980 年首次建成江苏徐州夹河煤矿大、小两食堂的组合网架屋盖结构以来,截止 1992 年底共已建成二十多幢组合网架结构^[1]。其中用于楼层结构有十幢,如 34 米×34 米的新乡百货大楼加层扩建工程、上海国际购物中心七、八、九层 27 米×27 米缺角五边形平面的高层楼层结构工程等。以往,对组合网架主要是注重于静力分析,对于动力问题还很少研究,已不能适应工程建设的需要。分析计算组合网架的动力特性,大多可采用组合结构的有限元法。本文试图按连续化途径,采用拟夹层板法来探讨组合网架的动力特性,以期求得显式来简捷计算确定组合网架的固有频率。

二、基本假定和计算模型

组合网架拟夹层板法的计算模型如图 1 所示,其基本假定为:

1. 带肋上弦板的肋以及下弦杆的设置相当稠密,一般要求组合网架在短跨方向的网格数要大于或等于 5。
2. 把上弦板假定为夹层板的上表层,其位置与平板有效截面形心轴重合或基本重合,忽

· 本文曾刊登在《第二届全国结构工程学术会议论文集》,1993