

文章编号 1000-5013(2006)04-0378-03

# 钢筋混凝土交错桁架结构的模态分析

黄奕辉 李 坤 罗才松

( 华侨大学土木工程学院, 福建 泉州 362021; 华南理工大学建筑学院, 广东 广州 510000)

**摘要** 利用有限元分析软件,对空间钢筋混凝土交错空腹桁架结构进行线性模态分析.在对该结构体系进行模态分析后,提取对结构有影响的前 12 阶模态,列出每一阶模态的自振周期及主振型,用于考察结构的质量分布和结构刚度.分析结果表明,该结构体系的振动周期较小,结构整体刚度较大,介于相同条件的框架和剪力墙之间.

**关键词** 交错桁架结构, 模态分析, 振型, 钢筋混凝土

**中图分类号** TU 375.502

**文献标识码** A

交错桁架结构体系产生于 20 世纪 60 年代中期,是一种既适合建造高层建筑,又节约建筑材料的新型结构体系<sup>[1]</sup>.交错桁架结构体系最初是以钢结构的形式应用于建筑结构的,在美国、澳大利亚等国家已有不少应用.在国内,对交错桁架结构的研究起步较晚,但发展迅速,对桁架结构的可靠性分析和力学优化相对较多,而对桁架结构的模态分析、动力分析及地震分析较少.本文就钢筋混凝土交错桁架结构进行模态分析,了解它的自振特性和周期,为该结构形式的实际设计与动力性能分析提供参考.

## 1 分析方法

交错桁架结构的模态分析,包括分析结构的自振周期和相应的主振型.自振周期及其主振型与其质量分布和结构刚度的大小有关,是固有属性.自振周期是表征结构刚性的指标,也是判别交错桁架结构是否会发生共振的依据.如果要进行动力时程分析,自振周期和振型是必要的.本文用 ANSYS 程序对该结构进行空间分析,考虑楼板的平面作用效应,采用杆系-层间模型.然后,在模态分析中,各杆件采用的是 Beam 4 单元,楼板采用 Shell 63 壳单元.它考虑了空间的变形和扭曲,又取消了楼板平面内刚度无穷大的假设,使结果更符合实际.由于梁单元和壳单元的节点都具有 6 个自由度,因此,在楼板与弦杆搭接处,不用删减自由度,只需将节点融合就具有较好的协调性.划分单元时,只要注意连接地方的单元不出现错位即可.虽然只有 8 层 1 跨,但节点已经达到 929 个,单元总数达 1 138 个.因此,选用对内存要求较高而计算速度较快的兰索斯算法,用于空间的交错空腹桁架结构体系的模态分析<sup>[2]</sup>.

## 2 实例与模态结果分析

本文例子是交错桁架结构体系的综合楼,两柱一跨 8 层,层高 4 m,等节间桁架跨度 20 m,节间跨度为 4 m,纵向柱距为 6 m,楼板厚度均为 150 mm.桁架层各杆的截面为 0.4 m × 0.8 m,边柱截面为 0.8 m × 1.0 m,混凝土强度等级 C40.楼面永久荷载标准值为 2.0 kPa,屋面永久荷载标准值为 1.5 kPa,桁架层填充墙厚 180 mm(标准表观密度 = 18 kPa).上述算例中,在顶层采用了立柱来支撑屋面,整体的空间模型如图 1 所示.考虑到 12 阶以后的振型对整个结构的贡献较小,所以本文只列出了前 12 阶模态型振型图,如图 2~9 所示.当阶数  $n$  为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 和 12 时,交错空腹桁架结构体系的前 12 阶自振周期  $T$  分别为 0.94, 0.90, 0.66, 0.29, 0.28, 0.21, 0.21, 0.20, 0.19, 0.18, 0.17 和 0.16.

**收稿日期** 2006-03-11

**作者简介** 黄奕辉(1962-),男,副教授,主要从事混凝土结构模态分析的研究. E-mail: huangyihui@hqu.edu.cn

**基金项目** 国家“863”高科技发展计划资助项目(2004AA33G050)

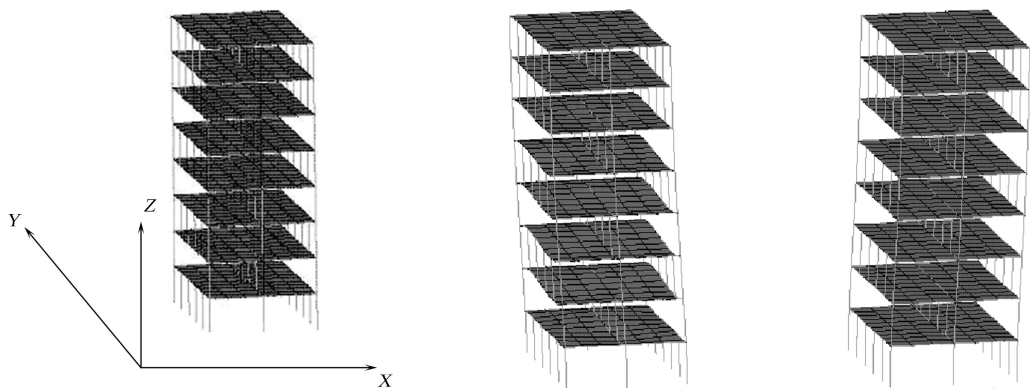


图 1 整体的空间模型图

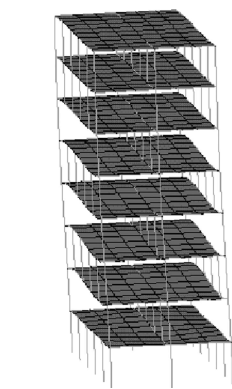


图 2 第 1 阶振型

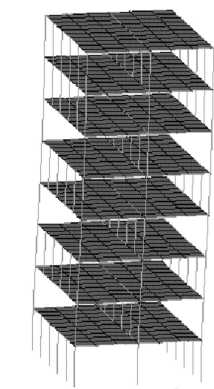


图 3 第 2 阶振型

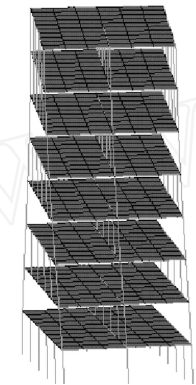


图 4 第 3 阶振型

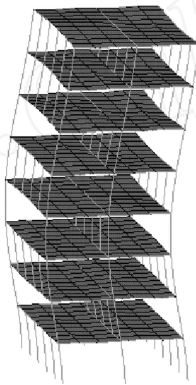


图 5 第 5 阶振型

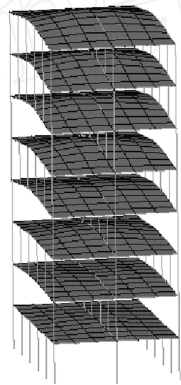


图 6 第 6 阶振型

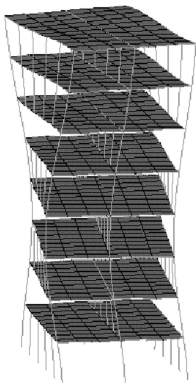


图 7 第 7 阶振型

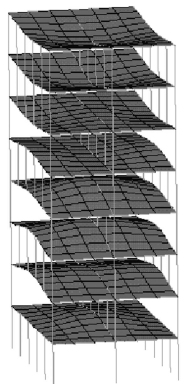


图 8 第 8 阶振型

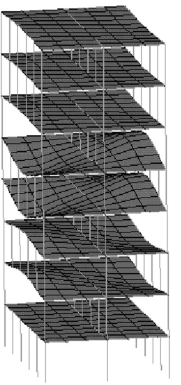
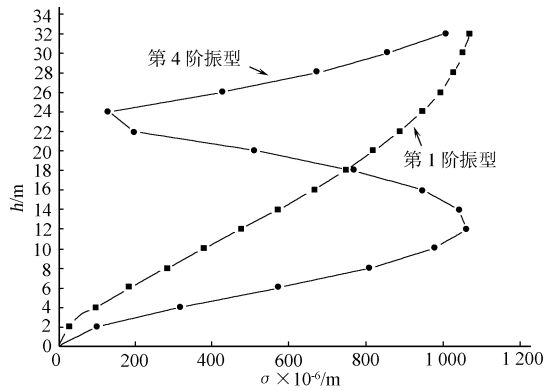


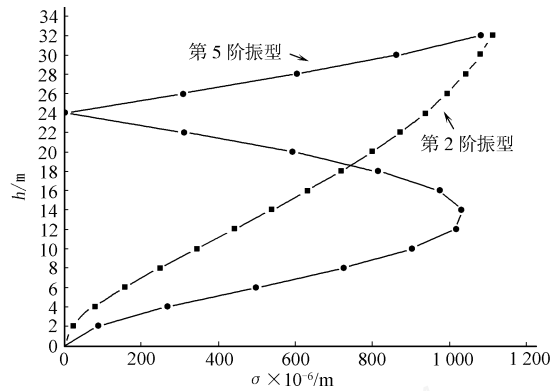
图 9 第 12 阶振型

由振型图可以看出,第 1 阶振型为沿  $Y$  向(横向)摆动,第 2 阶振型沿  $X$  向(纵向)摆动,第 3 阶振型为绕  $Z$  轴的扭转,第 4 阶振型为沿  $Y$  向摆动,第 5 阶振型为沿  $X$  向摆动,第 6 阶振型为楼板的竖向振动,第 7 阶振型为绕  $Z$  轴的扭转,第 8 阶到第 12 阶振型分别为楼板沿竖向的振动或者是扭曲,第 1,2 阶振型曲线变化平缓光滑,第 4,5 阶振型虽然分别与第 1,2 阶振动方向相同,但振型曲线开始出现畸变,如图 10 所示.图中,各楼面处高度为  $h$ ,位移为  $\delta$ .可见,从第 6 阶开始出现竖向振动的振型.

由于文中交错桁架结构体系空腹只取了一跨,在  $Y$  方向(横向)刚度较弱,所以第 1 阶振型为沿横向的振动.但第 1 阶振动周期较小,说明整体结构的空间刚度还是比较大的.扭转模态出现在第 3 阶,由新规范对结构不规则性的定义,说明结构在竖向上的不规则布置,给结构的抗震设计带来的一个比较重要的问题是,结构在地震作用下的扭转振动效应较突出.按照新的《JGJ 3 - 2002 高层建筑混凝土结构设计规程》的要求,结构扭转为主的第 1 自振周期  $T_t$  与平动为主的第 1 自振周期  $T_1$  之比,称为平扭周期比<sup>[3]</sup>.带转换层的复杂高层建筑的平扭周期比不应大于 0.85<sup>[4]</sup>.根据计算结果,平扭周期比  $T_t/T_1 = 0.702 < 0.85$ ,尽管钢筋混凝土交错空腹桁架结构的扭转效应比较突出,但还是符合规范要求的.从第 6 阶开始出现竖向振动的振型,第 8 阶往后,结构在竖向的振型开始发生畸变.因为钢筋混凝土交错桁架



(a) 第 1,4 阶振型



(b) 第 2,5 阶振型

图 10 部分振型的位移图示

结构为大跨度结构,且竖向的刚度分布不是很均匀,所以有必要研究竖向地震的作用。

### 3 结束语

(1) 通过模态分析,可以看出交错空腹桁架结构周期比较小,说明结构的整体刚度较大. 文[5]研究表明,其刚度介于相同条件的框架和剪力墙之间. 从本文研究的主要振型的变形曲线形式可以看出,层间相对位移中部较大,上部和底部较小,变形曲线为弯剪型. (2) 该结构的主振型(即低阶振型)为沿着  $x$  向(纵向)的振动,扭转振型也出现在低阶,但平扭周期比均符合规范的要求. 竖向振动出现的阶数比较靠前,考虑到结构的跨度较大,且沿竖向的刚度分布不均匀,所以在进行后续的抗震分析时有必要分析结构在竖向地震荷载作用下的响应. (3) 交错混合空腹桁架体系的竖向刚度分布的不均匀导致结构的扭转效应较突出,在实际设计中应该通过概念设计,利用桁架的交错布置,采用偶数槓对称结构来减小或避免这一不利影响。

### 参 考 文 献

- 1 Cohen M P. Design solution utilizing the staggered steel truss system[J]. AISC EJ, 1986, (3): 97 ~ 106
- 2 郝文化. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 中国水利水电出版社, 2005. 204 ~ 216
- 3 中国建筑科学研究院. JGJ 3 - 2002 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. 96 ~ 104
- 4 赵西安. 钢筋混凝土高层建筑结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995. 368 ~ 415
- 5 王万钊, 秦修煜, 范伯壅, 等. 钢筋混凝土桁架式框架在水平荷载下的性能试验研究[J]. 工程抗震, 1987, (3): 81 ~ 85

## Mode Analysis of Reinforced Concrete Staggered Vierendeel Truss

Huang Yihui Li Kun Luo Caisong

( College of Civil Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China;

College of Architecture and Civil Engineering, South China University of Technology, 510640, Guangzhou, China)

**Abstract** The linear modes of spatial reinforced concrete staggered vierendeel truss are analyzed by finite element software. The 1st to 12th vibration modes and periods which influence greatly on the truss are listed to investigate the distributions of the truss mass and stiffness. The analytical results show that: the vibration period of the truss is short, and the stiffness is between the equivalent frame and shear wall structure stiffness.

**Keywords** staggered vierendeel truss, mode analysis, vibration mode, reinforced concrete