

文章编号:1674-2869(2008)04-0065-04

# 板桁结合梁斜拉桥 3D-ANSYS 建模技术研究

李元松<sup>1,2</sup>, 李新平<sup>1</sup>, 姜天华<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学土木与建筑学院, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉工程大学环境与城建学院, 湖北 武汉 430074;

3. 武汉科技大学城建学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**以天兴洲大桥为背景, 分析大跨度板桁结合梁公铁两用斜拉桥的结构特点, 给出有限元法模型的假设条件与相关问题的处理技术。基于 ANSYS 平台, 利用 APDL 开发工具, 实现了大跨度斜拉桥的 3D 有限元程序化建模, 并详尽介绍了建模程序框架与功能模块的实现方法, 其成果可供桥梁设计与结构分析时参考。

**关键词:**板桁结合梁; 斜拉桥; 有限元法; 程序化建模

**中图分类号:**U448.27 **文献标识码:**A

## 0 引言

桥梁结构计算是贯穿从方案设计到结构设计、从施工设计到施工监控各个环节的重要任务之一。而选用合适的物理模型是结构计算的第一步, 也是最重要的一步, 理论分析不可能补偿由于错误选择结构体系带来的损失, 若选用的计算模型不恰当, 即使这种模型理论严密, 计算精确, 仍会导致错误的结论<sup>[1]</sup>。随着计算机技术的进步, 桥梁结构计算取得了较大的发展, 各类商用软件与专业软件层出不穷。然而, 计算模型的建立仍然是结构计算中最为困难的一步, 至今没有业界公认的既能精确模拟工程结构特性, 又较为实用高效的建模方法与商业软件。笔者试图介绍建立天兴洲特大桥计算模型过程中遇到的问题与解决方法, 以供其它类似桥梁计算建模时参考。

## 1 工程背景

武汉天兴洲长江大桥主桥结构为(98+196+

504+196+98)m 双塔三索面钢桁梁斜拉桥, 长 1092 m。上层公路 6 车道, 桥宽 27 m, 下层铁路按四线设计。其中两线为 1 级干线, 两线为客运专线。主梁为板桁结合钢桁梁, N 型桁架, 三片主桁, 桁宽 2×15 m, 桁高 15.2 m, 节间长 14 m。主塔采用混凝土结构, 倒 Y 型, 承台以上高度 188.5 m。主跨两侧各有 3×16 根镀锌平行钢丝斜拉索, 外挤双层 PE, 钢丝标准强度  $R_y^b=1\ 670\ \text{MPa}$ , 索规格共有 8 种, 最大截面为 451Φ7 mm, 最大索力为 1 250 t, 全桥共 192 根斜拉索。主桁上弦中部 756 m 范围内是钢正交异性板桥面, 两端各 168 m 范围内是混凝土结合板桥面。铁路桥面为纵横梁体系, 道碴桥面。每个主塔及桥墩处三片主桁下均设有竖向刚性支座, 纵向为活动。主梁铁路桥面在辅助墩处 56 m 范围内设 50 t/m 压重, 以抵抗活载作用下产生的负反力。天兴洲大桥全桥结构如图 1 所示。

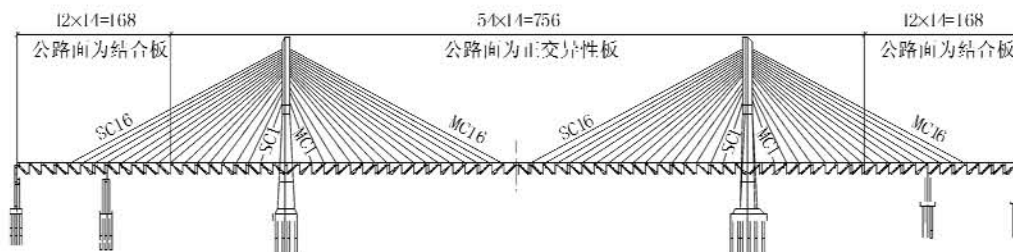


图1 天兴洲大桥结构示意图

Fig.1 The structure sketch of Tianxinzhou bridge

收稿日期:2008-03-19

作者简介:李元松(1964-),男,湖北应城人,副教授,博士。研究方向:土木工程结构数值分析,施工控制技术。

## 2 相关技术处理

### 2.1 假设条件

a. 假设桥面板和纵梁的形心在同一水平面上,不考虑板面对桁架上弦由于不同形心位置产生的附加扭矩;

b. 假设各节点满足理想连接条件即完全刚性连接,不考虑半铰效应;

c. 假定结构不发生塑性屈服即材料本构关系服从虎克定律;

d. 忽略单元桥面板的垂度变化;

e. 建模坐标定义为,顺桥向为 X 轴方向,横向为 Y 轴,竖向为 Z 轴,坐标原点为大桥主跨中截面与中桁下弦杆轴线的交点。

### 2.2 单元类型的选择

斜拉桥主梁模型:空间梁板单元组合模型。公路桥面正交异性板按静力等效原则<sup>[2]</sup>,转换为各向同性等厚的薄板,用板单元模拟(SHELL63)。公路桥横梁、铁路桁架、铁路桥面系(等效为格梁)等组成空间框架,用空间梁单元模拟(BEAM4)。由于该模型完全按照主梁的组成来模拟,即桥面采用板单元,桥面下的加劲梁和横梁都采用梁单元,可较为真实地反映结构的实际几何关系和质量分布。

斜拉索模型:索单元(LINK10),弹性模量用等效弹性模量替换。用一根等效弹性模量的直杆代替实际的曲线索。

斜拉桥主梁和索塔的组合:索塔用多段等截面空间梁单元(BEAM1)模拟,主梁与索塔根据实桥支承条件,组合成空间框架结构体系。

### 2.3 边界条件处理

自重以重力加速度与质量密度再结合构件体积由 ANSYS 程序换算成惯性力施加于对应节点;压重以面荷载形式施加于相应梁单元上;施工荷载则需经静力等效处理后,施加到相应节点上;移动荷载仅分析作用在节点时的状态,按移动过程经历的节点,形成荷载工况文件由程序求解。

边墩、辅助墩及主塔处下弦各支承节点均采用铸钢滑板支座。纵向全为活动,中桁各支座限制横向位移,而边桁各支座横向活动。抽象为力学模型时,边墩、辅助墩处下弦各支承节点竖向位移与转动约束,纵向位移自由,中桁各支点横向位移约束,边桁横向自由。

主塔柱基础结点各向完全约束,主塔与主梁交接处,主塔横梁单元节点与主梁下弦节点线位移耦合,角位移自由。

### 2.4 几何非线性因素的考虑

斜拉桥的结构特点是由索塔引出的柔性斜拉索作为主梁的中间弹性支承,以降低梁跨的截面弯矩,减轻梁重,从而提高了梁的跨越能力。斜拉桥的这种结构特点决定了几何非线性因素在其结构分析中的影响尤为突出,不容忽视。斜拉桥的非线性效应主要有:①大位移效应;②梁柱效应,即  $P\Delta$  效应;③斜拉索的垂度效应。

考虑斜拉索非线性变化的简便方法,是把它视为与它的弦长等长度的桁架直杆,其等效弹性模量包括材料变形、构造伸长和垂度变化等因素的影响,其表达式称为 Ernst 公式<sup>[3~5]</sup>

直接应用 ANSYS 自身的大位移功能<sup>[6~7]</sup>,设置分析类型,可以模拟结构的大位移效应。其设置方法为:

ANTYPE,STATIC	! 进行静力分析
NLGEOM,1	! 考虑大变形效应
AUTOST,1	! 自动时间步长
SSTIFS,ON	! 考虑应力刚化
SOLCONTROL,0	! 进行优化非线性分析
SOLVE	

处理梁柱效应的方法主要有:U. L. 列式法、T. L. 列式法、稳定函数法和几何刚度矩阵法<sup>[8~9]</sup>,上述方法各有其特点,考虑软件计算功能本文选用 U. L. 列式法计入  $P\Delta$  效应。

## 3 ANSYS 平台上的实现

### 3.1 建模思路

首先将描述半桥结构的各类信息定义为变量或数组,如单元总数、节点总数、单元类型数、材料类型数、截面类型等控制变量和坐标、单元、材料、单元实常数、边界约束等数组,按预先规划的格式将原始信息写入数据文件。然后根据结构的几何特点与空间位置关系将全桥模型分解为主梁、主塔、拉索与桥面板等若干子模型,分别编写建立各子模型的程序包括几何参数、物理力学参数、各类实常数数组的赋值,形成关键点,各类单元,并赋予材料与实常数等。最后用 APDL 编写主控宏文件分别调用初始化模块和各功能子模块,实现各子模块的组装,消除重复节点,通过对称映射命令形成全桥模型,再次消除重复节点和单元,施加边界约束与荷载。

### 3.2 主要程序框架

斜拉桥参数化建模程序主要由参数初始化、主桁梁、公路桥面板、主塔、边界条件处理与施工过程模拟等几个功能模块组成,程序框架见图 2。

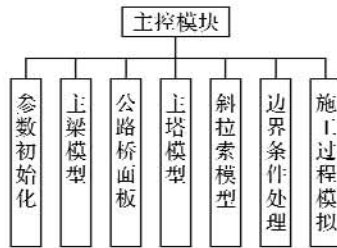


图2 斜拉桥建模程序框架

Fig. 2 The frame sketch of cable-stayed bridge modeling

### 3.3 各模块的功能实现

主控模块(TXZDQ. mac):完成 ANSYS 环境设置,控制程序执行流程,调用各子模块,将半桥模型对称映射,形成整桥模型,耦合重复节点并重新编码。

参数输入(Para\_input. mac):将各类原始数据形成数据文件,用 input 命令一次性读入计算机内存。

建模过程定义的控制变量主要有:单元数、关键点数、节点数、单元类型、材料类型数、梁截面类型数、板截面类型数、索截面类型数、约束数、节点荷载数、索单元个数、主塔梁单元个数、板单元个数、标准节段一端节点总数等。

定义的数组:节点数组、关键点数组、材料类型数组、梁实常数数组、板实常数数组、索实常数数组、单元类型数组、索内力数组、索单元信息数组、结点坐标数组、约束节点信息数组、荷载作用信息数组等。

主梁模块(Main\_bcam. mac):由于天兴洲大桥结构复杂,杆件的分布规律性较差,不宜抽象成完全的参数化模块,也不宜像实体模型那样,先构造几何模型然后由 ANSYS 自动划分网格。其特点是桁架以梁单元为主体,节段内各节点的坐标位置可准确给出,每个节段各节点轴线几何尺寸完全相同。因此主要借助 APDL 语言的命令流建模。先根据一个断面各已知节点的坐标建立关键点,共 31 个,然后以此为标准使用命令 Kgen, 40, 1, 31, 1, 14, 0, 0, 经复制生成左半部分的主梁桁架全部关键点和节点,这样每个相邻断面相同点位的节点编号相差 31,据此可用命令 L 逐节段生成主梁上弦、下弦、斜杆、竖杆、上弦横撑、上弦斜撑、公路纵横梁、铁路纵横梁和铁路平联等梁单元,并用 Latt 命令赋予各单元材料码、实常数编码和单元类型编码,若相邻断面的单属性相同,可用循环命令 DO... ENDDO 以节省命令条数。

公路桥面板(Highway\_plate. mac):建立公路桥面板模型。桥面板模型的建立相对较为简单,全桥分析时只需将主梁桁架上弦各节点按顺序连结

起来构成四边形平面即为板单元的四条边。SHELL63 既能反映弯曲能力和具有膜力模拟功能,可以承受平面内荷载和法向荷载,比较符合桥面板的受力特点,因此选用 SHELL63 单元模拟桥面板。

主塔模块(Main\_tower. mac):建立下塔墩、中塔柱与上塔柱模型。根据塔型的形状特征将主塔分为塔上部、塔中部以及塔下部三部分处理。塔上部包括塔顶部以及拉索区域,由于这一部分塔的受力情况比较复杂,处理时该部分的单元划分密些。塔中部包括拉索部分以下到塔与斜拉桥主梁连接部分。塔下部包括塔与斜拉桥主梁连接部分以下到塔底座区域。塔上大部分区域的截面不是固定的,处理时采用每一单元对应一个截面的方法。从下到上每隔 3 米建立一个单元,单元类型仍为 BEAM4。为保证节点编号的连续性,本节段使用 \* get, Kkp, kp, 0, num, max 命令获取桥梁部分关键点的最大编码。其余命令与前述主梁部分类似。

斜拉索模块(Stay\_cable. mac):采用等效弹性模量法。即将斜拉索视为与其弦长相同的杆件,采用 LINK10 单元,通过实常数定义斜拉索的面积和初始应变模拟斜拉索。值得注意的是此时初始应变与等效模量都取决于斜拉索内力的中间结果,需在 ANSYS 基本命令的基础上进行一些功能处理才能实现,将另文专门介绍。

边界条件处理模块(Bound\_cond. mac):完成约束处理与自由度耦合。

塔梁联接:ANSYS 提供了一种节点自由度耦合功能(CP 命令)很好地解决此类问题。其特点是根据实际的约束形式,将主梁上的节点与主塔节点在某一方向的自由度联接,联接后的节点自由度相同,而其它方向的自由度仍各自独立。这种特性很适合于模拟斜拉桥支座形式复杂多样的功能。

### 3.4 施工控制模块(Const\_mac)

天兴洲大桥施工采用对称悬臂施工法,施工过程模拟主要用到 ANSYS 的单元生死功能。先根据施工方案与受力特点进行规划,将主塔分为 3 个工况,主梁架设分为 16 个工况,全桥合拢为一个工况,二次恒载为一个工况,之后利用 ANSYS 求解器中的荷载步功能逐节段模拟计算,当遇到施工过程中的调索时,在荷载步之间修改材料参数(主要是斜拉索的等效弹性模量)与单元实常数(主要是索单元的初应变)。具体操作步骤为:①建立全桥完整模型;②根据规划的施工计算工况建立单元集;③“杀死”所有单元;④根据施工进度逐

节段激活单元集;⑤修改实常数,施加荷载与边界条件;⑥重复步骤④,⑤直至全桥合拢与桥面铺设竣工。

#### 4 成桥计算模型

基于 ANSYS 平台的 APDL 二次开发技术建立 3D 有限元模型,完成天兴洲大桥的成桥计算与施工模拟计算。全桥共 2637 个结点,5818 个梁单元,1248 个板单元和 192 个索单元。边墩与辅助墩处主梁下弦进行横向(Y 轴方向)、竖向约束(Z 轴方向)和纵向(X 轴方向)偏转约束。塔、梁在主塔横梁处结点三个线位移耦合与纵向角位移耦合,横向与竖向角位移自由。全桥施工分为 22 个工况。有限元计算模型如图 3~6 所示。

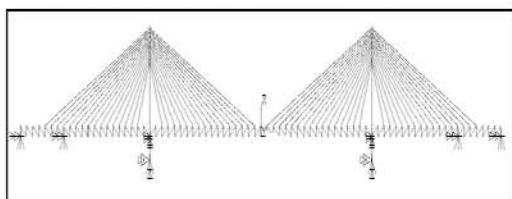


图 3 天兴洲大桥计算模型正立面图

Fig. 3 The frontispiece of calculating model of Tianxinzhou Bridge

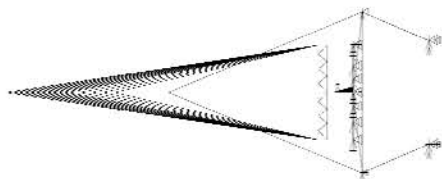


图 4 天兴洲大桥计算模型侧立面图

Fig. 4 The right view map of calculating model of Tianxinzhou Bridge

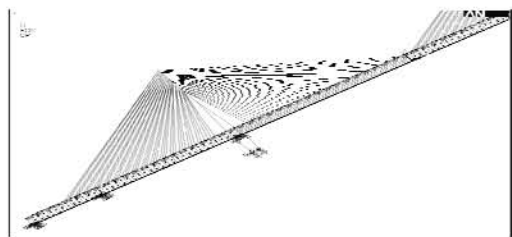


图 5 天兴洲大桥计算模型轴侧图

Fig. 5 The isometric view map of calculating model of Tianxinzhou Bridge

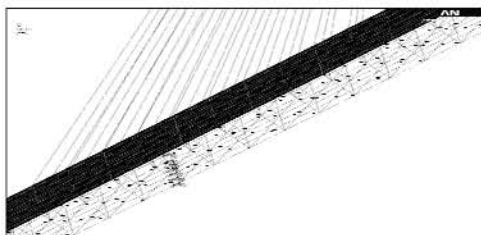


图 6 天兴洲大桥计算模型部分放大图

Fig. 6 The local magnifying map of calculating model of Tianxinzhou Bridge

#### 5 结 语

本文利用 ANSYS 二次开发技术,实现了大跨度板桁结合梁斜拉桥参数化建模。以武汉天兴洲大桥结构计算建模为例,阐述其实现过程。参数化结构分析程序的实现,给桥梁结构详细设计和施工控制计算带来了快捷的方法,不仅为专业的结构分析人员,也为不掌握 ANSYS 的人员进行有限元计算提供了方便。另外,这种有效的建模方法为其它结构计算参数化建模的实现提供了借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 叶贵如. 斜拉桥非线性有限元计算和施工过程分析[D]. 浙江大学建筑工程学院, 2000.
- [2] 戴公连, 李德建. 桥梁结构空间分析设计方法与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 1-15.
- [3] 程进, 江见鲸, 肖汝诚, 等. ANSYS 二次开发技术及在确定斜拉桥成桥初始恒载索力中的应用[J]. 公路交通科技, 2002, 19(3): 50-52.
- [4] 黄 侨, 吴红林, 刘绍云. 大跨度斜拉桥几何非线性分析及程序实现[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(11): 1520-1523.
- [5] 田仲初, 何 斌, 顾东煌, 等. 基于 ANSYS 空间梁单元的桥梁数组建模技术[J]. 长沙交通学院学报, 2004, 20(2): 15-18.
- [6] 博弈创作室. ANSYS9.0 经典产品高级分析技术与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 13-21.
- [7] 阙前华, 谭长建, 张 娟, 等. ANSYS 高级工程应用实例分析与二次开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 66-110.
- [8] 张雪松, 梁 鹏, 贾丽君, 等. 非线性因素对超大跨度斜拉桥成桥内力的影响[J]. 公路交通科技, 2004, 21(9): 47-51.
- [9] Pao-Hsui Wang, Hung-Ta Lin, Tzu-Yang Tang. Study on Nonlinear Analysis of a Highly Redundant Cable-Stayed Bridge [J]. Computers & Structures, 2002, 80: 165-182.

(下转第 72 页)

- 脱活性染料废水[J]. 中国给水排水, 2008, 24(1): 51-53.
- 和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [4] 国家环保总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水

## Research on the treatment of dye wastewater by hydroxylation and oxidation processing

WANG Ying-ru<sup>1</sup>, HU Wen-yun<sup>2</sup>, LI Yan-qiu<sup>2</sup>

(1. School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;  
2. Department of Chemical and Environmental Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** The synthetic dye wastewater was treated by the process of hydroxylation and oxidation. UASB reactor and biological contact oxidation are used in the hydroxylation and oxidation processing respectively. The effects of flow rate and hydraulic retention time(HRT) of UASB reactor, volumetric gas rate and the hydraulic retention time of the bio contact oxidation on the efficiency of the wastewater were studied respectively, and the best values of them were obtained in the laboratory. The values as follow: flow rate 50 L/h, HRT 3 h; volumetric gas rate 1.2 m<sup>3</sup>/h, HRT 1.5 h.

**Key words:** hydroxylation and oxidation processing; UASB reactor; biological contact oxidation tank; dying wastewater; COD<sub>cr</sub>

本文编辑: 萧 宁



(上接第 68 页)

## Study on 3D-ANSYS modeling technique for large span cable-stayed bridge with a plate-truss composite beam

LI Yuan-song<sup>1,2</sup>, LI Xin-ping<sup>1</sup>, JIANG Tian-hua<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;  
2. School of Environmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;  
3. Urban Construction College, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The structure characteristic of large-span cable-stayed bridges with a plate-truss composite beam was analyzed. The assumptive condition and disposal technique of FEM modeling were given with Tianxinzhou Bridge as a practice example. Based on ANSYS software, a 3D FEM model was established by means of APDL tool. Subsequently, the program frame and implement method of every function model were depicted in detail. The results will be available for design and calculating in bridge engineering.

**Key words:** plate truss composite beam; cable stayed bridge; finite element method; programmable modeling

本文编辑: 萧 宁