

文章编号: 1002-0268 (2007) 04-0108-05

基于 ANSYS 的预应力混凝土曲线 梁桥三维施工仿真分析

程 进, 沈旭东, 孙 斌, 肖汝诚
(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要: 简要介绍了 ANSYS 软件的基本功能及其相应的二次开发工具。然后, 重点讨论了基于 ANSYS 软件开发预应力混凝土曲线梁桥施工仿真程序中存在的问题。最后, 利用已开发好的 ANSYS 软件对一座在建的预应力混凝土曲线连续刚构桥进行了三维施工仿真分析, 结果表明, 利用现有大型有限元软件 ANSYS 的二次开发工具进行预应力混凝土曲线梁桥静力问题的求解是可行的, 也是有效的, 为今后同类桥梁的分析提供了新的方法和途径。

关键词: 桥梁工程; 曲线梁桥; 三维仿真分析; 预应力混凝土; 施工分析

中图分类号: U445

文献标识码: A

Three-dimensional Simulation Analysis of Prestressed Concrete Curved Beam Bridges During Construction

CHENG Jin, SHEN Xu-dong, SUN Bin, XIAO Ru-cheng

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: ANSYS is powerful finite element analysis software. In this paper, the fundamental features of ANSYS software are presented. ANSYS provides three programming techniques to users. These programming techniques include the user interface design language (UIDL), ANSYS parametric design language (APDL) and user programmable features (UPFs). Based on the APDL programming technique, a fundamental procedure of developing a constructed prestressed concrete curved beam bridge simulation program is developed. Some problems in developing a constructed prestressed concrete curved beam bridge simulation program based on ANSYS software are discussed and some suggestions are given. Finally, the developed program is applied to analyze static behavior of a constructed prestressed concrete curved beam bridge. The results show that unitizing existing finite element software such as ANSYS for the static analysis of constructed prestressed concrete curved beam bridges is feasible and efficient.

Key words: bridges engineering; curved beam bridge; three-dimensional simulation analysis; prestressed concrete; construction analysis

0 引言

目前, 曲线梁桥分析方法主要有梁格系法、有限条法和基于三维板壳元和实体元的有限元法 3 种。梁格系法的基本思路是将桥梁上部结构离散为一个刚度近似等效的梁格体系代替, 分析这种等效的梁格体系后再将其结果还原到原结构中得到最终所需的计算结果。该法易于理解, 应用广泛。然而, 该法不能考虑

剪力滞、扭转、畸变产生的截面翘曲的影响。有限条法可以分析箱梁包括弯曲、扭转、翘曲、畸变、横向弯曲在内的各种变形特征。其缺点是不能分析曲线不规则或沿纵向变截面的曲线箱梁桥。基于三维板壳元和实体元有限元法被认为是最精确的曲线梁桥分析法, 该方法不仅可广泛地适用于各种形式的曲线梁桥, 还能方便地分析翘曲、畸变、剪力滞等现象。随着现代计算机硬件性能和可视化技术的不断提高, 国

收稿日期: 2005-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50408037)

作者简介: 程进 (1971-), 男, 上海人, 副研究员, 从事桥梁结构理论、可靠度分析及抗风方面的研究。(chengjin@tsinghua.org.cn)

内学者已相继开发出多个基于三维板壳元和实体元有限元法的曲线梁桥专用分析软件。然而,这些专用软件的研制和开发需要投入大量的人力、物力,且一般来说,这些软件的前后处理功能都不强,如何利用现有的有限元分析软件进行曲线梁桥的分析和计算,是桥梁工程师所关心的问题。

ANSYS 软件是国内外学者广泛采用的一种大型有限元软件。然而,由于该软件是通用性有限元软件,因此无法直接将其应用到曲线梁桥静力问题的求解,而必须对其进行二次开发后才能使用。令人遗憾的是目前很少有文献介绍如何利用 ANSYS 提供的二次开发工具进行曲线梁桥静力问题的求解,对于利用该软件进行曲线梁桥施工过程中的仿真计算则更少。本文试图在这方面做一些探索性的工作。首先,简要介绍 ANSYS 软件的基本功能及其相应的二次开发工具。其次,重点讨论了基于 ANSYS 软件开发预应力混凝土曲线梁桥施工仿真程序中存在的一些问题。最后,利用已开发好的 ANSYS 软件成功地对一在建的预应力混凝土曲线连续刚构桥进行了三维施工仿真分析。

1 ANSYS 软件简介^[1~5]

ANSYS 是融结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件,可广泛用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等一般工业及科学研究。该软件具有以下几个主要特点:

(1) 完备的前处理功能

ANSYS 不仅提供了一个强大的实体建模及网格划分工具,可以方便地构造数学模型及有限元模型,而且还专门设有与我们所熟悉的一些大型通用有限元分析软件的数据接口(如 MSC/NSSTRAN, ALGOR, ABAQUS 等),允许从这些程序读取有限元数据,甚至材料特性与边界条件,完成 ANSYS 中的初步建模工作。此外,ANSYS 还具有近 190 种单元类型,这些丰富的单元类型能使工程人员方便而准确地构建出反映实际结构的仿真计算模型。

(2) 强大的求解器

ANSYS 提供了对各种物理场量的分析,是目前世界范围内唯一能融结构、热、电磁、流体、声学于一体的有限元分析软件。除了常规的线性、非线性结构静、动力分析外,还能解决高度非线性结构动力分析、结构线性及非线性屈曲分析。

(3) 方便的后处理器

ANSYS 的后处理器分为通用后处理模块 (POST1) 和时间历程后处理模块 (POST26) 两部分。该后处理器可以很容易获得求解过程中的计算结果并对其进行显示。这些结果可能包括位移、温度、应力、应变、速度及热流等,输出形式可以有图形显示和数据列表两种。

(4) 提供了多种进行二次开发的工具

ANSYS 除了具有较为完善的分析功能外,同时还为用户进行二次开发提供了多种实用工具。如宏 (Marco)、用户界面设计语言 (UIDL)、参数设计语言 (APDL) 及用户编程特性 (UPFs)。

2 基于 ANSYS 软件开发中的一些问题

本文基于前面介绍的一种 ANSYS 二次开发工具——APDL 语言编写了一套预应力混凝土曲线梁桥施工分析程序。该程序能较真实地模拟预应力混凝土曲线梁桥施工的全过程,给出各施工阶段的应力值。在开发该程序的过程中,需要解决和注意一些关键问题。下面对这些问题作一简要介绍,并给出相应的解决方案。

2.1 单元类型的选取

预应力混凝土曲线梁桥主要是由混凝土和预应力钢筋两种材料组成。其中混凝土通常采用 ANSYS 提供的 SOLID 系列单元来模拟。这种系列的单元类型主要包括 SOLID45、SOLID65 和 SOLID95 等。SOLID65 单元与 SOLID45 单元(三维结构实体单元)相似,只是增加了描述开裂与压碎的性能。SOLID95 单元为 20 节点的实体单元,该单元计算精度最高,但其效率最差。在综合考虑了这三种单元的计算精度和效率的基础上,本文选择了 SOLID65 单元来模拟混凝土。预应力钢筋采用 LINK8 单元模拟。有关这两种单元类型的详细介绍可见文献[2, 3]。

2.2 施工过程的模拟

本文采用 ANSYS 提供的单元生死功能来模拟预应力混凝土曲线梁桥施工的全过程。施工方法采用桥梁工程中常用的悬臂施工法。

所谓单元生死是在模型中加入或删除材料,使模型中相应的单元或生或死。要达到单元死的效果,并非将杀死的单元从模型中删除,而是将其刚度矩阵乘以一个很小的因子,为了减少求解的方程数和避免病态条件,还要将死自由度约束住。此时死单元的载荷、质量、阻尼、比热及其他类似的效果都将被设定为零。单元活也并非是在模型中添加单元,而是在当

前的载荷步中重新激活已经存在但在前面载荷步里被杀死的单元。当一个单元被重新激活时,其刚度、质量、单元载荷等将恢复其原始的数值,重新激活的单元没有应变记录。

在具体的APDL语言编程中,一般是先杀死所有的单元,然后令某一施工段中相关的单元为生。比如在一曲线梁桥施工模拟中,当模拟0号块的施工时,先杀死全桥的单元,对应的命令为:

EKILL, ELEM,

其中, ELEM 表示全桥的所有单元。

然后选出0号块的单元(包括0号块主梁,主墩和相关的预应力钢束),使这些单元为生,对应的命令为:

EALIVE, ELEM,

其中, ELEM 表示0号块的所有单元。

接着在约束死单元节点的各自由度,设置好各相关常数,求解运行即模拟了0号块的施工过程。在分析下一个施工阶段时,即在已浇注0号块的基础上浇注1号块,只要激活1号块的相关混凝土单元和预应力钢束单元,此时模型中活着的单元为0号块主梁、1号块主梁、主墩和相关应张拉的钢束,求解即可得到1号块施工模拟后的计算结果。

如此类推,通过相关命令的编写可以实现各个悬臂施工过程分别计算。

采用悬臂施工方法除了节段悬臂施工外,还包括边跨合龙、中跨合龙等阶段,这涉及到体系的转换问题。以边跨合龙为例,施工模拟只需在最大悬臂的基础上,激活边跨现浇段的单元,拆除原死单元约束,设置相应边界条件,求解便可得边跨合龙的计算结果。

体系转换还可以通过荷载工况叠加的方法得以实现。仍以边跨合龙状态的计算为例,首先通过单元生死等方法计算出最大悬臂状态的內力和应力结果,将这些结果存入数据库中,形成荷载工况I,然后计算仅考虑边跨作用荷载时结构的受力状态,这时设为荷载工况II,最后,将荷载工况I中的结果和荷载工况II中的结果按照叠加原理形成最终的边跨合拢状态结果。

单元生死功能和荷载工况之间的运算使有限元模拟复杂的施工过程成为可能,与这些功能相关的语句在基于ANSYS的各种施工分析程序中得到了广泛的应用。

2.3 预应力钢筋的处理

在混凝土桥梁中,预应力技术应用广泛,预应力

钢筋对保证整个桥梁结构的安全起着极为重要的作用。能否合理模拟预应力已成为施工模拟程序成功与否的关键。ANSYS中对预应力的模拟方法很多,而且没有一种是十全十美的,评价各种模拟方法主要从计算精度、建模可行性、计算资源的占有情况等几个方面来考察,下面大致介绍一下ANSYS中常用的几种预应力钢筋处理方法。

等效荷载法是一种较常用的模拟预应力效应的方法。它是通过分析预应力筋脱离体的內力平衡,得到预加力对结构的等效荷载,即用一组集中力、力矩或分布荷载外力来等效地代替预应力效应。该方法具有概念清楚,实施方便的优点。但该方法也具有以下几个较为明显的缺点:

(1) 无法考虑力筋对混凝土的作用分布和方向。曲线力筋对混凝土作用在各处是不同的,等效时没有考虑,而水平分布力也没有考虑。

(2) 在外荷载作用下的共同作用难以考虑,不能确定力筋在外荷载作用下的应力增量。

(3) 张拉过程难以模拟,且无法模拟由于应力损失引起力筋各处应力不等的因素。

(4) 细部计算结果与实际情况误差较大,不宜进行详尽的应力分析。

概括起来说,等效荷载法适用与配筋较简单的结构,而对复杂的结构并不适用。

实体力筋法,即在实体建模时,预应力筋和混凝土独立建模。混凝土一般用实体单元,如solid系列单元来模拟,而预应力筋一般用杆单元来模拟,即link系列单元来模拟。其中对预应力的模拟一般又有降温方法和初应变方法。降温方法比较简单,同时可以设定不同位置的预应力不等,即能够对应力损失进行模拟;初应变法通常不能考虑预应力损失,否则每个单元的实常数各不相等,工作量较大。实体力筋法在建模处理上常用有实体分割法和节点耦合法两种处理方法。下面对这两种实体力筋法作一简要介绍。

实体分割法的基本思路是先以混凝土结构的几何尺寸创建实体模型,然后用工作平面和力筋线拖拉形成的面,将混凝土实体分割,将分割后体上的一条与力筋线型相同的线定义为力筋线,这样不断分割下去,最终形成许多复杂的体和多条力筋线,然后分别进行单元划分、施加预应力、荷载、边界条件后进行求解。这种方法是基于几何模型的处理,力筋位置准确,计算结果精确,但当力筋线型复杂时,建模较为麻烦,甚至会导致布尔运算失败。

节点耦合法的基本思路是分别建立实体和力筋的

几何模型, 创建几何模型时不必考虑二者的关系, 然后对几何模型的实体进行各自的单元划分, 单元划分后采用耦合节点自由度将预应力筋单元和实体单元联系起来, 这种方法是基于有限元模型的处理, 其基本步骤可归结如下:

- (1) 建立混凝土实体几何模型, 此时不考虑力筋。
- (2) 建立预应力筋线的几何模型, 此时不考虑混凝土实体的存在。
- (3) 上面两种几何模型分别按一定的要求划分单元。
- (4) 选取所有预应力筋上节点, 并定义选择集, 将上述力筋节点存入数组。
- (5) 选取除预应力筋上节点外的所有其余节点, 并定义为混凝土选择集。
- (6) 让预应力筋节点数组搜寻所有最近的混凝土单元节点号, 并存入数组中。
- (7) 耦合预应力筋节点与最近的混凝土单元节点自由度。
- (8) 施加边界条件和荷载, 求解。

采用节点耦合法建模比较简单, 缺点是当混凝土单元划分不够密时, 力筋节点位置可能有些走动, 造成一定误差, 为消除该误差, 势必将混凝土单元划分的较密, 即以牺牲计算效率获得良好的计算精度, 该方法为解决大量复杂力筋线型的有效方法。

综上所述, 配有复杂预应力筋的桥梁建议采用实体力筋法来模拟预应力筋。在可能的条件下尽量采用实体分割法来处理预应力钢筋, 因为该方法计算精度最高。然而当遇到复杂力筋线如曲线钢筋模拟时, 可考虑用节点耦合法。鉴于本文研究的对象是预应力混凝土曲线梁桥, 所以采用节点耦合法来模拟预应力钢筋。

3 算例分析

3.1 工程概况

某公路匝道曲线连续刚构桥按全预应力混凝土进行设计, 采用悬臂浇注施工。本曲线梁桥跨度为 55 + 75 + 55 m, 曲率半径为 236 m。主梁采用单箱单室箱形截面, 桥宽为 12.5 m, 设 6% 单向横坡。箱梁在主墩顶和支座处设有横隔板。

混凝土和预应力钢束的相关材料参数详见表 1。

3.2 三维有限元模型

利用 ANSYS 软件, 建立了该桥有限元分析模型, 如图 1 所示。全桥按设计图纸共分成 55 个节段。主

表 1 混凝土及钢材的力学参数

Tab 1 Mechanics parameters of concrete and steel

	主梁	主墩	预应力筋
材料	50 号混凝土	30 号混凝土	标准 270 级钢绞线
弹模 E/MPa	3.45×10^4	3.0×10^4	1.95×10^5
抗压标准强度/MPa	32.4	20.1	
抗拉标准强度/MPa	2.65	2.01	1 860
容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	26	26	78.5
泊松比 μ	0.17	0.17	0.3
线膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.2×10^{-5}

梁采用空间实体单元模拟 (ANSYS 中 SOLID65 单元); 预应力钢束采用空间杆单元模拟 (ANSYS 中 LINK8 单元), 预应力钢束按截面分为顶板束, 腹板束, 底板束, 以及竖向预应力钢束。

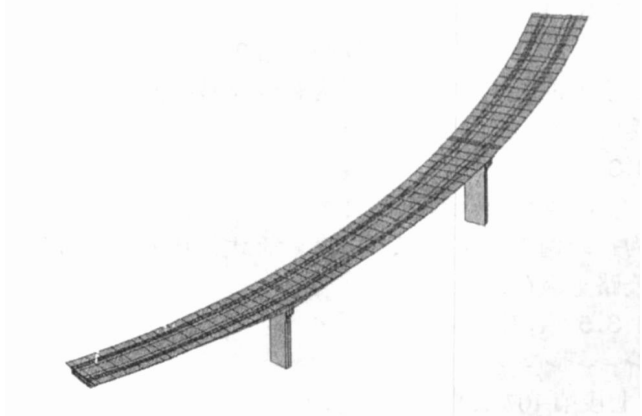


图 1 有限元计算模型
Fig 1 Finite element model

悬臂施工模拟时考虑墩底固结, 即约束墩底节点的 3 个自由度, 合龙以后再竖向约束支座处节点。全桥划分网格后, 共计单元 207 835 个, 节点 68 043 个。其中混凝土部分计单元 198 872 个, 节点 58 174 个; 预应力钢束部分计单元 8 963 个, 节点 9 869 个。

3.3 仿真计算与分析

整个仿真计算根据实际情况可分为有 16 个工况, 其中 1~ 10 工况模拟悬臂浇注施工, 边跨合龙 1 个阶段, 中跨合龙 1 个阶段, 二期恒载浇注 1 个阶段, 结构整体升降温各 1 个阶段, 活载作用 1 个阶段。

3.3.1 悬臂浇注施工模拟

模拟曲线梁桥从 0 号块施工直至最大悬臂的过程。每个工况中的有限元模型相当于一双悬臂曲线梁。下面取典型工况说明如何进行曲线梁桥悬臂浇注的模拟。

0 号块模拟首先选取出此阶段起作用的单元, 包括 3 部分: 0 号块主梁混凝土单元, 对应预应力钢束

单元,主墩混凝土单元。此工况其余单元均需要杀死,并约束死自由度。约束墩底,求解模型,就能得到0号块施工模拟的计算结果。

0号块模拟计算完毕后,不退出求解器,直接激活1号块主梁混凝土单元和对应预应力钢束单元,删去相应死自由度上的约束,求解后即得到施工至1号块结构的应力变形。

3.3.2 边跨合龙施工模拟

边跨合龙实现了本算例的第1次体系转换,由双悬臂结构转换为一端悬臂一端有竖向支撑的结构。

此阶段需激活悬臂浇注阶段被杀死的边跨混凝土单元和相应的预应力钢束单元,支座位置施加约束,然后与最大悬臂状态原有的活单元一起求解,即可获得此状态下的应力值。

3.3.3 中跨合龙施工模拟

中跨合龙实现了本算例的第2次体系转换,三跨预应力混凝土曲线连续刚构梁桥成形。模拟方法与边跨合龙类似,不再赘述。

3.3.4 使用阶段

根据桥梁规范,结合本工程实例,确定荷载组合为:结构自重+预应力+汽车荷载;其中汽车荷载为公路Ⅰ级荷载。

3.3.5 计算结果及分析

(上接第107页)

4 结论

本文综合了钢管混凝土受弯构件徐变的主要影响因素,基于钢管混凝土受弯构件徐变计算方法给出了设计计算公式。该公式形式简单,应用设计公式计算的徐变值和理论方法计算的结果符合良好,说明设计公式可靠,具有较高精度,便于实际工程人员应用。

参考文献:

- [1] 韩冰,王元丰.钢管混凝土受弯构件的徐变分析[J].铁道标准设计,1999(5):19-20.
- [2] 韩冰,王元丰.长期荷载作用下钢管混凝土受弯构件承载力研

究[J].公路交通科技,2005,22(5):114-116

4 结语

通过本文的叙述和实例显示,可以看出利用ANSYS提供的二次开发工具(APDL语言)进行预应力混凝土曲线梁桥静力问题的求解是完全可能的,也是有效的,掌握和运用好这一工具可使我们无须花大量人力、物力就能进行复杂结构施工过程的仿真分析。

参考文献:

- [1] 程进,江见鲸,肖汝诚,项海帆.基于ANSYS的程序界面设计和应用[J].四川建筑科学研究,2002,28(2):49-50.
- [2] SAS IP, Inc., ANSYS UIDL Programmer's Guide [S].
- [3] SAS IP, Inc., ANSYS APDL Programmer's Guide [S].
- [4] SAS IP, Inc., Guide to ANSYS User Programmable Features [S].
- [5] 刘涛,杨凤鹏.精通ANSYS[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [6] 谭建国.使用ANSYS6.0进行有限元分析[M].北京:北京大学出版社,2002.
- [7] 陆新征,江见鲸.利用ANSYSSOLID65分析复杂应力状态下的混凝土结构[C]//ANSYS CHINA 2002用户年会论文集.2002:473-478.
- [8] 沈旭东.节段施工曲线连续刚构桥空间应力分析[D].上海:同济大学,2005.
- [3] 韩冰,王元丰.徐变对钢管混凝土受弯构件挠度的影响分析[C]//工程力学(增刊).2000.
- [4] 钟善桐.钢管混凝土结构(第三版)[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [5] 谭素杰,齐加连.长期荷载对钢管混凝土受压构件强度影响的实验研究[J].哈尔滨建筑工程学院学报,1987(2):10-24.
- [6] 周希平,徐忠勇.施工中混凝土斜拉桥徐变系数研究[J].华南理工大学学报,2001(1):86-90.
- [7] 王湛.钢管膨胀混凝土的徐变[J].哈尔滨建筑工程学院学报,1994(3):14-17.
- [8] 周纪芾.实用回归分析方法[M].上海:上海科学技术出版社,1990.
- [9] 茆诗松,等.回归分析及其试验设计(第二版)[M].上海:华东师范大学出版社,1981.