

文章编号: 1002-0268 (2004) 06-0069-04

# 用 ANSYS 对 T 梁和空心板梁桥进行结构仿真分析的研究

吴 炜<sup>1</sup>, 翁 洋<sup>2</sup>, 吕建鸣<sup>1</sup>

(1. 交通部公路科学研究所, 北京 100088; 2 杭州市公路管理局, 浙江 杭州 310004)

**摘要:** 本文介绍桥梁三维造型系统 Bridge3D 软件和大型通用有限元软件 ANSYS 的接口程序的开发。用接口程序能够将 Bridge3D 中的桥梁参数转换成用 ANSYS 进行结构三维仿真分析的三维实体单元结点数据, 并对 T 梁桥和空心板梁桥进行全桥空间仿真分析。通过 ANSYS 的计算结果与荷载横向分布理论的计算结果相比较, 分析与讨论了简支 T 梁桥和空心板梁桥荷载横向分布计算方法的适用性及其精确性问题。

**关键词:** 荷载横向分布; T 梁桥和空心板梁桥; 有限元; 三维实体单元

中图分类号: U448.212

文献标识码: A

## Study on Simulation of T-shaped Beam and Hollow Slab Bridge by ANSYS

WU Wei<sup>1</sup>, WENG Yang<sup>2</sup>, LV Jian-ming<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Highway, MOC, Beijing 100088, China;

2 Hangzhou Road Management Bureau, Zhejiang Hangzhou 310004, China)

**Abstract:** An interchange program combines Bridge3D with ANSYS will be introduced in this paper. The interchange program can transform the parameter information of Bridge3D into the information of element and node for structure simulation analysis with ANSYS. Some numerical results from ANSYS are compared with these from transverse distribution of load theory to reflect the applicability and accuracy of transverse distribution of load theory of T-shaped beam bridge and hollow slab bridge.

**Key words:** Transverse distribution of load; T-shaped beam bridge and hollow slab bridge; Finite element; 3-Dim- element

## 0 引言

荷载横向分布在梁桥设计中是一个重要的概念, 它有效的将梁桥设计中的空间问题简化成平面问题, 为梁桥设计提供了方便。荷载横向分布方法是一种近似的计算方法, 在理论推导时作了某些物理上和数学上的假设, 它的计算结果与实际值之间存在着误差。各种荷载横向分布方法都有各自的适用范围。对各种荷载横向分布方法的适用性及其精确性进行讨论是很有必要的。

以往讨论各种荷载横向分布方法通常需要做大量的桥梁实测试验, 并将实测试验的结果与用荷载横向分布理论的计算结果相比较来进行讨论。桥梁实测试

验需要投入大量的人力、物力和时间, 实际操作时也会遇到很多困难。随着微型计算机的迅猛发展, 计算机技术得到日新月异的进步, 用大型有限元软件对桥梁结构进行仿真分析已成为可能。通过空间有限元仿真分析来讨论各种荷载横向分布计算方法的适用性及其精确性也不失为一种理想的方法。本文将讨论用大型通用有限元软件 ANSYS 来分析简支 T 梁桥和空心板梁桥的荷载横向分布问题。

## 1 Bridge3D 和 ANSYS 的简介

桥梁三维造型 Bridge3D 软件是交通部公路科学研究所完成国家九五攻关项目“GPS、航测遥感, CAD 集成技术开发”的课题时所开发的软件。Bridge3D 软

件是基于特征的参数化桥梁构件三维造型软件, 能使设计者在计算机上直观的构造桥梁构件。工程设计人员可用该 Bridge3D 方便的形成桥梁部件的三维透视渲染图, 并且直观的检验桥梁部件设计的美学效果。图1为 Bridge3D 所建的 T 梁桥和空心板梁桥三维模型。



图1 T梁桥和空心板梁桥上部结构影像图

图2为 ANSYS 的图形用户界面。ANSYS 是世界上著名的大型有限元分析软件, 已经成为土木建筑行业分析软件的主流, 在钢结构和钢筋混凝土房屋建筑, 体育场馆, 桥梁, 大坝, 隧道以及地下建筑物等工程中得到了广泛的应用。它可以对这些结构在各种外荷载条件下的受力, 变形, 稳定性及各种动力特性作出全面分析, 从力学分析, 组合分析等方面提出了全面的解决方案, 为土木工程师提供了功能强大的分析手段和分析功能。

本文将综合运用 Bridge3D 和 ANSYS 对 T 梁桥和



图2 ANSYS 的图形用户界面

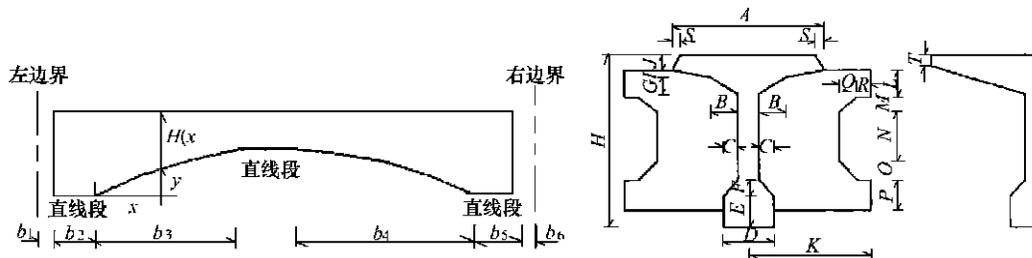


图3 T梁纵、横断面参数图

如图3中T梁横断面参数图所示, 设  $A, B, C, \dots, T$  为支点截面的参数,  $A_1, B_1, C_1, \dots, T_1$  为跨中截面的参数。等截面段  $b_2$  内的各截面参数与支点截面参数相同, 跨中附近的直线段内的各截面参数与跨中截面参数相同, 而变截面段  $b_3$  范围内的参数采用线性插值的方法计算。因此可求得  $b_3$  变截面段任意位置  $x$  处截面参数, 这些参数都是变量  $x$  的函数。显然,  $b_5$  段内各截面参数的算法和  $b_2$  段相同,  $b_4$  段内各截面参数

空心板梁桥进行空间仿真分析。

## 2 接口程序开发

ANSYS 是大型通用有限元软件, 被广泛的应用在房屋、桥梁、大坝、隧道以及地下建筑物等工程中。在用 ANSYS 进行桥梁结构分析时, 一般要通过实体建模、网格划分等步骤来建立有限元模型。然而, 对于不熟悉 ANSYS 命令的桥梁专业设计人员而言, 用这种方式建立有限元模型显然是一件复杂、费时的工作。

Bridge3D 软件是参数化桥梁三维造型软件, 能使设计者在计算机上直观的构造桥梁构件。由于它是专业化桥梁设计软件, 桥梁工程师只需确定桥梁构件的参数, 就能方便快捷的建立起桥梁模型, 这比 ANSYS 建模简单易行得多。

开发接口程序将 Bridge3D 中的桥梁几何模型转换为 ANSYS 进行分析的有限元模型, 就可以综合利用 Bridge3D 建模方便和 ANSYS 分析功能强大的优点, 使桥梁有限元仿真分析更加方便快捷, 更加适用于桥梁专业设计人员。下面介绍接口程序中三维模型数据转换时的基本思路以及接口程序的界面及操作。

### 2.1 T梁的离散方法

本文将选择 ANSYS 的三维实体单元进行仿真分析。图3为桥梁三维造型一跨变截面 T 梁纵向和横断面参数示意图。在桥梁三维造型系统 Bridge 3D 中, 分别由支点截面和跨中截面参数控制变截面 T 梁的形状, 其它截面的参数根据支点截面和跨中截面的各参数插值得。

的算法和  $b_3$  段相同。有了  $b_2, b_3, b_4, b_5$  段内各截面的参数后, 即可求得截面上各结点的坐标, 从而建立 T 梁的三维空间模型。建立起 T 梁空间三维模型以后, 接口程序将用三维实体单元对 T 梁桥进行结构空间离散, 并且对离散后空间结构进行整体编号, 从而形成三维实体有限元网格, 如图4所示。具体的方法如下:

(1) 根据用户在界面中输入的纵向最大长度, 接口程序在顺桥方向将 T 梁桥分为多个单元组, 每个单

元组由相同个数的三维实体单元组成。从左到右依次给单元组编号为 1, 2, 3...直至最后一个单元组。如图 5 所示。

(2) 对横截面划分成网格后, 还需对其进行编号。在同一个截面上的编码方法是分三部分进行编号, 通常先对顶板进行编号, 再对肋板进行编号。如图 5 所示。

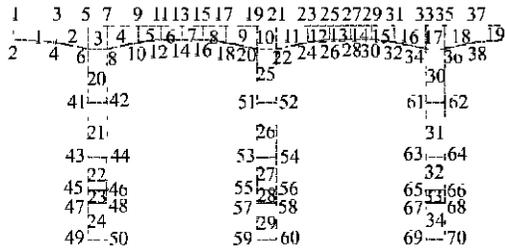


图 4 一跨 T 梁桥有限元网格

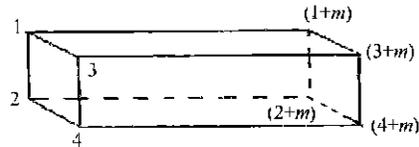


图 5 划分后的 T 梁横断面和纵断面

(3) 以第一组第一个单元为例, 介绍每个单元结点的编号方法。图 4 中  $m$  为每个截面的结点总数, 在相邻单元组的分段面上按相同的规律编号, 则对应点的号差为  $m$ 。取前后两个截面上邻近对应的 8 个结点组成的六面体作为一个单元, 则后面的 4 个结点的编号分别由前面的结点加编号  $m$  即可得到。如此类推得整个桥梁结构的单元结点编号。

采用上述方法使单元的分组与编号具有一定的规律性, 易于单元的管理。另外采用这种方法编号能在很大程度上降低结构刚度矩阵的带宽, 从而提高解题速度减少计算时间。

## 2.2 施加约束与荷载

为了模拟 T 梁桥的简支情况, 必须对三维实体有限元网格施加约束。在本接口程序中是按下面方法处理的: 在 T 梁三维实体有限元网格形成时, 所有 T 梁上的结点均不加约束。用鼠标在屏幕上选取需要施加约束的结点, 接口程序将自动记录该结点的坐标, 并且自动增加一个杆单元、一个固定结点 (全约束不可动)。该杆单元一端与梁体上需要约束的结点铰接, 一端与固定结点连接, 从而限定该结点顺杆单元方向的位移。约束杆单元本身是有刚度的, 可以给定一个很大的刚度, 以模拟刚性支撑, 也可以给出支座实际刚度, 以模拟弹性支撑。

与有限元网格施加荷载的方法与施加约束的方法类似。用鼠标在屏幕上选取需要施加荷载的结点, 接口程序将自动记录该结点的坐标, 然后根据用户在界面中输入的荷载大小、荷载方向、作用阶段等简单数据, 就可以确定有限元模型的荷载信息。

## 2.3 空心板梁的离散方法

空心板梁的离散方法与 T 梁的离散方法基本相同, 区别仅在于空心板梁通常是等截面的,  $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$ 、 $b_5$  和跨中直线段内的截面参数均相同。空心板梁施加约束与荷载的方法也与 T 梁相同。本文不再叙述离散过程。

## 2.4 接口程序界面

在使用接口程序以前, 首先要在 Bridge3D 中建立桥梁模型, 如图 6 所示。然后用接口程序将其转换到 ANSYS 进行分析。在使用接口程序时, 主要分 3 步来进行。

(1) 在接口程序中提取 Bridge3D 已建成的桥梁几何模型参数。并对该桥梁几何模型进行离散化, 形成三维实体单元的有限元网格, 如图 7 所示。



图 6 桥梁三维模型

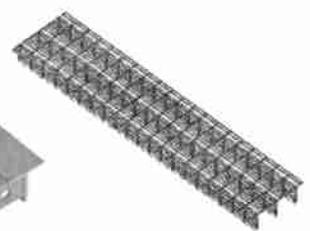


图 7 桥梁模型离散图

(2) 形成有限元网格后, 对有限元网格施加约束与荷载, 最终生成 ANSYS 命令流文件。

(3) 在 ANSYS 中导入该命令流文件, 形成计算模型进行静、动态分析, 如图 8 所示。

## 3 应用示例

限于篇幅本文仅介绍 2 个典型算例。

算例 1: 基本数据如图 9 为计算跨径  $L = 20.00\text{m}$



图8 ANSYS中的桥梁模型

的简支梁桥，其横截面如图10所示，在2号梁跨中施加一集中力  $P=200\text{kN}$ 。当在桥梁跨径方向不布置横隔梁或均匀布置3、5、7、9、11片横隔梁时，分别用荷载横向分布方法和ANSYS计算跨中各主梁的弯矩值。



图9 简支梁桥

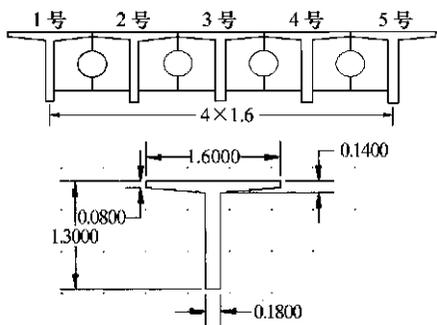


图10 梁桥横截面及尺寸/m

本例宽跨比  $\frac{B}{L} = \frac{5 \times 1.6}{20} = 0.4 < 0.5$ ，一般按刚性横梁法计算。

刚性横梁法和ANSYS的计算结果列于表1。

表1 刚性横梁法和ANSYS的计算结果  $\text{kN}\cdot\text{m}$

横隔梁片数	计算方法	1号梁	2号梁	3号梁	4号梁	5号梁
0	ANSYS	289.78	366.55	329.81	11.14	7.28
	刚性横梁法	376.20	287.10	198.00	108.90	19.998
3	ANSYS	373.28	321.83	210.80	94.85	10.76
	刚性横梁法	376.20	287.10	198.00	108.90	19.998
5	ANSYS	419.54	269.88	186.42	114.23	-0.069
	刚性横梁法	376.20	287.10	198.00	108.90	19.998
7	ANSYS	425.69	267.71	178.96	110.95	6.69
	刚性横梁法	376.20	287.10	198.00	108.90	19.998
9	ANSYS	426.86	267.85	176.71	110.24	8.34
	刚性横梁法	376.20	287.10	198.00	108.90	19.998
11	ANSYS	428.86	267.24	175.57	109.86	9.15
	刚性横梁法	376.20	287.10	198.00	108.90	19.998

根据表1列出的计算结果，可以得出以下结论：

(1) 当不加横隔梁（即加0片横隔梁）时，用刚

性横梁法的计算结果与ANSYS的计算结果的误差很大，如1号梁为  $\frac{376.20 - 289.78}{289.78} = 0.298 = 29.8\%$ （下同），2号梁为21.7%，3号梁为40.0%。这说明刚性横梁法适用于具有可靠横向联结的梁桥上。

(2) 当加3片横隔梁时（两片端横隔梁，跨中1片内横隔梁），用刚性横梁法的计算结果与ANSYS的计算结果的误差明显减小，如1号梁为0.8%，2号梁为10.8%，3号梁为6.1%。这说明有无内横隔梁对刚性横梁法的计算精度有较大影响，有内横隔梁时刚性横梁法的计算精度有很大提高。

(3) 当加5片横隔梁时，用刚性横梁法的计算结果与ANSYS的计算结果的误差继续减小，两者的分布规律也较为吻合。这说明梁桥横向联结继续加强时，刚性横梁法的计算精度更加提高。如果再多增加横隔梁（如加7片、9片、11片横隔梁），则用刚性横梁法的计算结果与ANSYS的计算结果的误差变化微小，已趋向稳定。

算例2：基本数据如图11所示，计算跨径  $L$  分别为9.7、10.2、10.7、11.2m的简支空心板梁桥，其横截面由5片空心板梁组成，截面尺寸如图12所示。在它们的2、3、4号梁跨中均施加集中力100kN。分别用荷载横向分布方法和ANSYS计算跨中各主梁的弯矩值。空心板梁桥适合用铰接板法进行计算。铰接板法和ANSYS的计算结果列于表2。

分析表2中的计算结果，可以得出以下结论：

(1) 对于不同跨径的空心板简支梁桥，铰接板法

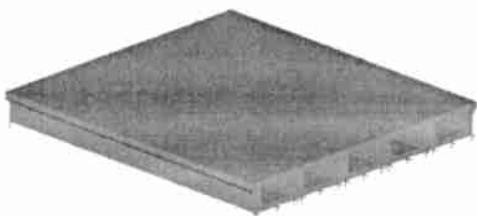


图11 空心板梁简支梁桥

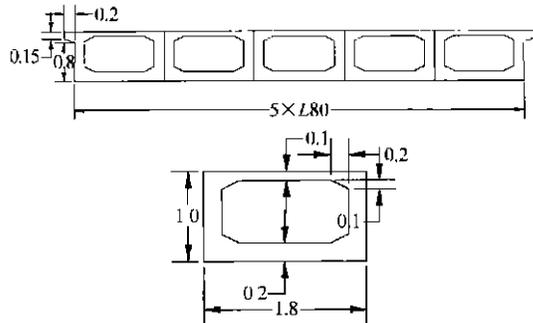


图12 空心板梁桥横截面/m

（下转第80页）

时,记录了约2h长样本,实测的环境随机振动加速度响应及频谱图如图4所示。由振动频谱图可知结构的实测固有频率为16.753Hz。

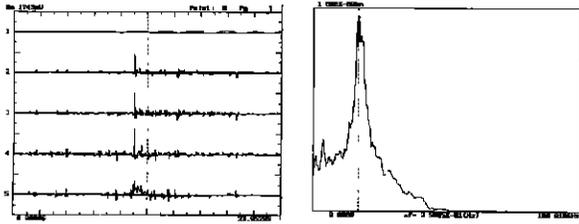


图4 环境随机振动加速度响应及频谱图

### 5 结论

(1) 西基桥桥跨结构的前5阶模态均以桥墩振动为主,桥面板的一阶竖弯模态出现在第6阶,以靠高墩边跨为主,说明该桥桥墩较柔。

(2) 所测桥跨桥面板的一阶竖弯振动频率出现在系统第7阶模态,振动频率为13.321Hz,较跳车试验激发的桥面板一阶频率12.127Hz稍大,说明桥面板的实测竖弯刚度较理论值小,这与桥面板已开裂有关。

(3) 环境随机振动实测的桥跨结构固有频率为16.753Hz,与系统第12阶模态频率17.162接近,从振型图上可知,该模态为以所测桥跨桥面板竖弯振动模态为主,实测固有频率值较理论值稍小,也说明桥面板的竖弯刚度有所降低。

(4) 从跳车和环境随机振动试验的频谱图可看出,二者激发的结构模态并不一致,这是因为跳车试验竖向振动能量较大,激发的模态必定以桥面板的一阶竖弯为主;而环境随机振动能量较弱,激发的结构模态则由引起结构振动的当时环境因素决定,因环境因素是随机的,故试验时的环境因素不一定以桥面板一阶竖弯模态为主。

#### 参考文献:

[1] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996  
 [2] 范立础, 胡世德, 叶爱君. 大跨度桥梁抗震设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.  
 [3] ANSYS 5.5 ANSYS On Line Help, ANSYS Inc, 1999.  
 [4] 张俊平. 桥梁检测 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002

(上接第72页)

的计算结果和 ANSYS 的计算结果是基本吻合的, 这说明空心板简支梁桥用铰接板法计算是合适的。

表2 铰接法和 ANSYS 计算结果 kN·m

跨径/m	计算方法	1号梁	2号梁	3号梁	4号梁	5号梁
9.7	铰接板法	140.65	146.47	151.08	146.47	140.65
	ANSYS	123.18	152.01	177.13	152.01	123.18
10.2	铰接板法	147.90	155.04	158.87	155.04	147.90
	ANSYS	136.45	156.51	179.07	156.51	136.45
10.7	铰接板法	155.15	162.64	166.65	162.64	155.15
	ANSYS	149.81	160.48	181.91	160.48	149.81
11.2	铰接板法	165.20	169.12	171.36	169.12	165.20
	ANSYS	163.81	164.06	184.26	164.06	163.81

(2) 随着空心板简支梁桥跨径的不断增大, 边梁跨中的内力用铰接板法的计算结果与 ANSYS 的计算结果误差在逐渐减小。如跨径为9.7m的简支梁

桥, 其边梁跨中内力的误差为14.2%; 跨径为10.2m, 10.7m, 11.2m的简支梁桥, 边梁跨中内力的误差分别为8.4%、3.6%、0.8%, 误差明显有减小趋势。即对于相同宽度的空心板简支梁桥, 随着其跨径的不断增大, 用铰接板法计算边梁跨中的内力的精度将提高。

#### 参考文献:

[1] 李国豪, 石洞. 公路桥梁荷载横向分布计算 (第二版) [M]. 人民交通出版社, 1987.  
 [2] 王勳成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法 (第二版) [M]. 清华大学出版社, 1997.  
 [3] 范立础. 桥梁工程 (上册) [M]. 人民交通出版社, 1996.  
 [4] 谭建国. 使用 ANSYS6.0 进行有限元分析 [M]. 北京大学出版社, 2002.  
 [5] ANSYS 公司技术资料. ANSYS 入门手册及入门习题集 [C]. 2002.