

## 考虑局部细节特性的结构多尺度模拟方法研究<sup>\*</sup>

孙正华<sup>1</sup> 李兆霞<sup>2</sup> 陈鸿天<sup>3</sup> 殷爱国<sup>2</sup>

(1. 江苏省建筑科学研究院, 江苏省建筑工程质量检测中心, 南京 210008; 2. 东南大学  
土木工程学院 南京 210096; 3. 香港理工大学土木与结构工程系, 香港九龙)

(1. Jiangsu Institute of Building Science, Jiangsu Testing Center For Quality of Construction Engineering;

2. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096;

3. Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong)

**[摘要]** 本文的目的是研究如何考虑局部细节特性如焊连接部位的应力集中影响来进行结构动力特性和静力响应模拟和分析。为此, 采用子结构和约束方程的方法分别建立含局部焊接细节的桥梁结构钢箱梁纵向加劲桁架的不同尺度的有限元模型, 并用此有限元模型进行该结构动力特性和静力响应分析, 然后与传统有限元模型的分析结果及加劲桁架缩尺实验模型的实测结果进行对比。研究结果表明, 采用子结构方法能有效地利用大型商用软件建立该类结构的有限元模型并进行非线性分析, 对于大型复杂结构如一个主跨达到千米以上的大跨桥梁结构, 如果采用本文提出的建模方法, 在桥梁结构的局部焊接细节部分的模拟达到有限元单元特征尺寸为毫米级, 则建立的有限元模型实际上已经是一个结构多尺度有限元模型。这样的模型就可用于不同尺度下的结构整体特性分析和局部热点应力分析。

**[关键词]** 子结构 有限元模型 焊接细节 多尺度 桥梁加劲桁架

**ABSTRACT:** This paper studies how to develop the multi-scale FE models in which the feature of local detailed such as the stress concentration on the welded components can be considered and to make the simulation on the structural response as well as local stress on hot-spots. Therefore, the multi-scale FE model including welded components of the longitudinal fortified truss of bridge steel box girder is developed based on substructure and coupling equations respectively, then modal and static analysis are carried out by using the developed FE model in this paper. The results of the dynamic properties and stresses calculated by the multi-scale FE model are compared with those from the experiment and those calculated by traditional FE models, which suggests that the developed multi-scale FE model of the studied truss based on substructure would be valid in the analyses on both structural and local hotspot behavior. The proposed approach for FE modeling can be used to develop the multi-scale models of long-span bridges as the basic model of the structure in the further nonlinear static simulation such as the hot spot stress analysis.

**KEYWORDS:** Substructure Finite element model Welding details Multi-scale modeling Bridge truss

### 引言

近年来, 我国已建成了许多以斜拉桥和悬索桥为主的大跨桥梁, 这些大跨桥梁一般都是城市甚至是国家的重要交通运输的枢纽工程和标志性建筑, 对它们的投资巨大, 对国民经济有着重要的影响, 一旦发生破坏, 造成的损失将难以估量, 所以, 对大跨桥梁进行结构安全健康监测以确保其安全运营就势在必行, 现已成为目前国内外研究热点<sup>[1-2]</sup>。随着结构健康监测系统在大跨桥梁上的应用, 桥梁结构的有限元建模与分析越来越引起重视, 关于桥梁结构有限元模拟的文章也有很多<sup>[3-5]</sup>, 但大多采用的是脊骨梁模型, 这样的模型用来进行健康监测和损伤评估已不能满足要

求<sup>[6,7]</sup>, 这就需要建立面向结构安全健康监测的有限元模型, 这样的模型除了动力特性要满足要求外, 在结构应力模拟中, 还要能够反映关键构件的焊、连接细节处的应力集中。对于大跨桥梁结构, 如果处处都是按照实际构造来模拟, 这样建立的有限元模型将是十分庞大的, 对于计算和分析必将带来很多困难。实际上这样的模型对于实际工程问题来说也是没有必要的, 这就需要建立既能反映局部细节特性又不影响整体模拟的有限元模型。

本文以某大跨桥梁为工程背景, 从大桥的整体静力和动力响应分析结果可以找出其相对薄弱和易发生疲劳损伤的部位, 其中钢箱梁的纵向加劲桁架结构的焊接部位往往是疲劳裂纹早期萌生的部位<sup>[8]</sup>, 所以选取某大跨桥梁钢箱梁纵向加劲桁架结构的典型标准段为研究对象, 研究如何考

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50278017); 高等学校博士学科点专项科研基金(20040286031); 香港政府研资局(RGC)资助项目(PolyU PolyU5134/03e)

虑结构的局部细节特性(主要是焊接细节特性)进行有限元建模和分析。

### 1 考虑焊接细节特性的结构建模方法

为了探讨考虑局部细节特性的有限元模拟过程中包括建模方法、模型参数修正、模型验证等的关键问题,根据某大跨桥梁整体模拟分析结果<sup>[8]</sup>选取钢箱梁纵向加劲桁架结构的典型标准段按照1:5的比例制作了缩尺实验结构(如图1、2所示),并对此缩尺模型测试了其动态特性以及在多种实验工况下的静动力响应分析。为了考虑局部细节特性的结构模拟研究的需要,该缩尺实验结构模型不仅在几何和材料方面、更重要的是在局部焊接细节方面做到与结构原型尽量一致。

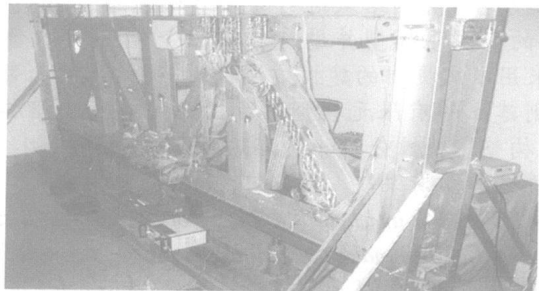


图1 钢箱梁加劲桁架结构实验缩尺模型

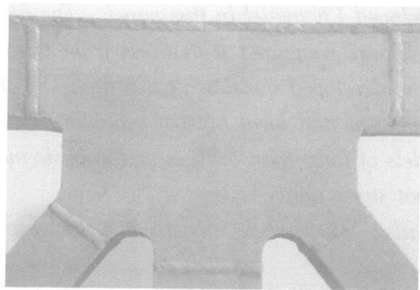


图2 焊接节点处的构造

进行此钢桁架缩尺模型有限元模拟研究的目的是为了能够建立既能反映局部细节特性又不影响整体模拟的结构有限元模型。所以在建立此缩尺结构的有限元模型时就不能简单地对其采用一般梁单元或一般壳单元或实体单元来进行模拟,因为采用梁单元建立的模型局部焊接处只有一个节点,无法反映局部信息,壳单元和实体单元虽然能反映局部信息,但是单元数众多,对于这样一个实验室模型可以整体采用壳单元甚至是实体单元,但是对于复杂土木工程结构如大跨桥梁来说,这样是不可行的,所以需要研究既能反映局部特性又能反映整体信息的有限元模型,对于此缩尺模型在整体尺度下采用梁单元局部细节处采用壳单元这样的多尺度有限元模型来模拟,就可以兼

顾整体和局部信息了,而且这样模拟的研究结果对一类大跨桥梁结构以损伤分析为目标有限元模拟有参考价值。

对于这样的需要兼顾整体和局部分析的有限元模拟问题,子结构方法、多点约束方程方法以及子模型方法都可以达到此目的,但是子模型方法需要进行“二次分析”所以在此就不予考虑,而仅考虑子结构和多点约束方程这两种方法,并找出适合结构损伤分析需要的较优的方法。为了便于分析比较及验证考虑局部细节特性的有限元模型的有效性,下面在建立有限元模型时,作为对比,同时也分别采用一般梁单元、一般壳单元等传统的建模方法来模拟结构。

#### 1.1 基于子结构方法的有限元模型

利用子结构方法建模可能是有效的解决途径之一。子结构技术是大型复杂结构有限元分析的重要工具之一。通常的做法是选取典型结构的一部分作为结构子块,称为一个子结构,子结构中也可以再套子结构,称为多重子结构。各层子结构

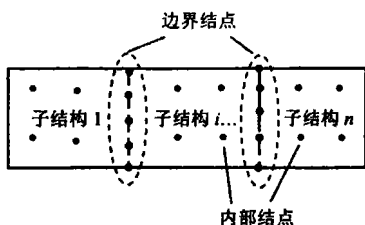


图3 子结构示意

中用以和其它子结构或其它单元相联结的节点称为边界节点或外部节点,其余节点称为内部节点,见图3所示。

它是将复杂的结构分成较易处理的、较小的结构(子结构)的一种算法,每个子结构的模型建立都是独立的。其自由度按静力凝聚法缩减,然后将缩减后的子结构矩阵重新组装起来,并求解以得到整体结构的解<sup>[9]</sup>。

在用子结构方法建立的含局部细节特性的有限元模型中,上、下弦杆的中间部位以及竖杆和斜腹杆采用梁单元来模拟,焊接节点部位采用壳单元模拟,整个焊接节点处作为一个子结构。材料参数采用材性实验实测结果,各部分的截面参数根据实际尺寸计算得到。由于焊接节点处的焊缝以及焊缝与母材交接的这些地方的材料属性甚至是几何属性同母材都有所不同,而且结构在焊接加工过程中不可避免的会产生残余应力和残余应变,所以在子结构内部单元划分时充分考虑到这些因素的影响,建立有限元模型时把母材、焊缝以及两者的连接区分开考虑,采用不同的材料属性和几何属性,当然焊缝处的材料属性包括弹性模量、残余应力、残余应变等是需要进一步的修正因素,这部分的内容笔者将另外给出。梁和壳单元两者的交界处也就是子结构的边界处,采用约束

方程方法来处理,这样建立的有限元模型见图4所示,其中(a)是缩尺结构的整体有限元模型,(b)是子结构内部的单元划分。子结构A内部共有4656个单元,4719个节点,子结构B内有2128个单元,2156个节点,由于包含子结构的模型在整体求解过程中是作为一个超级单元的,所以整个模型只有216个单元,813个节点。局部焊接细节部分的有限元单元特征尺寸都是10mm。

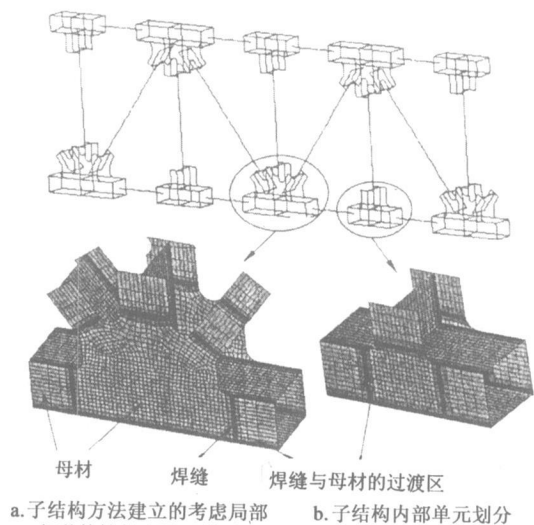


图4 有限元模型及单元划分

## 1.2 采用多点约束方法建立的有限元模型

采用多点约束方法建立的有限元模型中关于焊接节点部位的处理和用子结构方法的一样,焊接节点部位仍然采用壳单元来模拟,其它部位同子结构建模方法一样采用梁单元来模拟,整个结构单元数21366,节点数21365,有限元模型见图5a所示。这里局部焊接细节部分的有限元单元特征尺寸都是10mm。从这里可以看出如果算上子结构内部单元的话,两者的单元和节点数是一样的,但是子结构方法中把节点部位作为一个超级单元,所以从整体来说单元数较少。而仅用多点约束方程建立的有限元模型中的单元和节点数要比采用子结构方法建立的模型多得多。

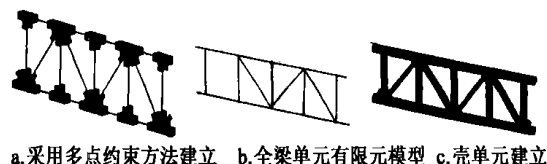


图5 不同方法建立的有限元之模型

## 1.3 用传统方法建立的有限元模型

全部采用梁单元建立的有限元模型见图5b所示,整个模型共182个单元,175个节点。全部

采用壳单元建立有限元模型见图5c所示,划分单元时焊接节点部位单元划分较细,其余部分单元划分相对较粗,整个模型共6224个单元,5861个节点,如果模拟局部焊接处的细节构造,考虑局部焊缝处的材料属性同母材的不同,则整个模型有34946个单元,34711个节点,比采用多点约束方程方法建立的模型单元数和节点数要略多一些,比用子结构方法建立的模型要多得多。

## 2 模型验证

上述各种有限元模型是否正确、各自的优劣如何需要进行模型验证和分析。模型验证和分析主要是基于实验缩尺结构的动力特性和静力响应的实测结果。

### 2.1 实验概述

如图1所示的实验缩尺模型的主要结构尺寸、焊缝形式、加工工艺等均与桥梁构件原型实际相似为准则,材料采用普通Q235钢,整个模型高1.32m,长4.2m,加工好的缩尺模型见图1所示。焊接处的节点构造见图2所示。实验时静载

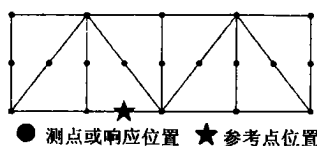


图6 模态测试测点布置

加载设备:集中载荷采用实验机和千斤顶相结合;应力应变测试设备:微应变计,应变花,力传感器, YJ-28 型静态电

阻应变仪, Y6C-9 动态电阻应变仪。动态特性测试时采用6172(A)型加速度传感器,5114型力锤,力传感器灵敏度10mV/unit, RACK-500W-ICP型通道控制器(含TS5857电荷放大器),电荷放大器灵敏度100mV/unit, HEAC200C功率放大器, AZ108智能信号采集处理分析仪, DELL手提电脑, MACRAS机械及结构模态分析软件V6.1。测试时采用力锤脉冲激励,单点采集、多点敲击的方法,在每个点上平均采集两次,取两个测量的平均值作为该点的测量值。分析方法采用实模态、整体拟合、按最大自由度归一的方法,分析频率为1000Hz。为了尽量减少边界条件对结构自身的模态参数影响,在实际测量动力特性时将结构上面两端用螺栓挂在反力架上。

### 2.2 动力特性验证

在几种有限元模型上施加与实验实测动力特性相接近的边界条件(上端悬挂、下端自由)并对其进行动力特性分析,图7列出了不同有限元模型计算出的频率值以及和实测频率值的对比,图8列出了用全壳单元有限元模型计算出的前10阶振型图,其它有限元模型计算出的振型基本一致,由于篇幅所限,这里不再一一列出。从图7可

以看出,采用子结构方法和多点约束方程的方法建立的有限元模型计算出的动力特性和用梁单元和壳单元有限元模型计算出的频率值相差不大,而且与实测值对比可以看出总体上相差也不大。但是有些模型的计算值和实测值之间还是有一定的误差的,这主要是由于模拟时有些因素是无法精确模拟还有待进一步的修正,但这并不影响其进行整体动力特性分析。从这可以说明采用子结构方法和多点约束方程方法建立的有限元模型可以用来进行整体动力特性分析。

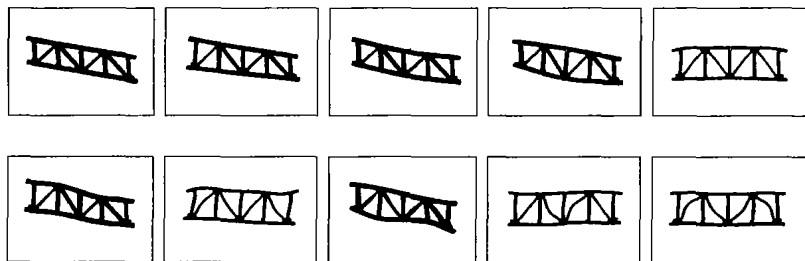


图 8 全壳单元模型计算的前 10 阶振型

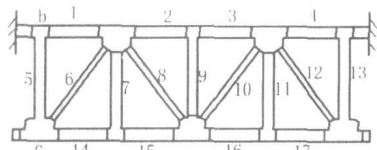


图 9 测量位置点

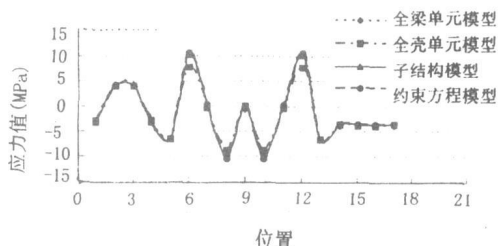


图 10 不同有限元模型计算结果对比

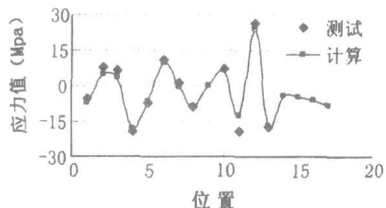


图 11 全壳单元模型计算结果与测试值的对比

出,不同有限元模型之间计算出的整体应力值相差很小,从图 11 中可以看出实测值和计算值之间相差也不大,说明用子结构方法和用多点约束方程建立的多尺度有限元模型可以用来进行局部热

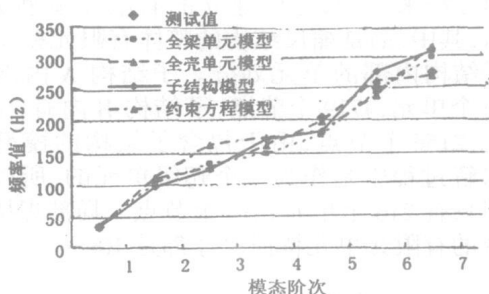


图 7 不同有限元模型计算动力特性对比

### 2.3 静力响应验证

对上面所做的几种有限元模型施加同样的边界约束(上弦杆两端固定、下弦杆两端自由),并在下弦杆的中点施加集中载荷(见图 9),不同有限元模型计算出的应力值如图 10 所示。图 11 对比了用壳单元建立的有限元模型计算值和对应实测值之间的对比,其中位置见图 9 所示。从图 10 中可以看

点应力分析,而无须采用先整体计算,再二次分析方法,这样就大大简化了二次分析时边界条件的选取。

### 2.4 多尺度模型计算的局部热点应力验证

在同 2.2 一样的边界条件和载荷条件下,用子结构方法建立的有限元模型计算得到的局部热点应力如图 12 的 a、b、c 所示,其中 a、b、c 对应结构的位置见图 9 所示。为便于对比,图中也列出了同样荷载同样边界条件下全壳单元模型计算得到的相应部位的应力值,见图 12 的 a'、b'、c' 所示,约束方程模型计算结果同子结构的一样,在此就不再列出。从图 12 可以看出,用子结构有限元模型计算出的局部应力分布同壳单元是一样,只是在子结构内外交界处有一定的误差,如果子结构的边界取离焊缝稍远处,避开应力集中的区域,则这里的误差对我们研究焊趾处的应力分布并没有影响,此子结构模型完全可以用来研究焊趾处的应力。

### 3 不同模型的计算效率分析

表 1 对比了几种有限元模型的单元数目和计算效率,从表 1 可以看出,采用子结构方法建立的不同尺度有限元模型能够提高静力响应和动力特性的计算效率,而采用约束方程的方法虽然也能解决局部热点应力计算问题,但计算时间很长。对于如此一个实验模型来说,只是一个很小的结

构,计算效率提高尚且如此显著,对于大型复杂结构如大跨桥梁结构来说,特别是在进行车载、地震载荷、风场等仿真分析或进行局部非线性等分析时,用子结构建立的有限元模型的计算效率将会显著提高。

表 1 子结构有限元模型和传统壳单元有限元模型计算效率对比

计算模型	全梁单元模型	全壳单元模型	子结构模型	约束方程模型
单元数	220	34946	216	21366
静力计算时间(s)	1	402	6	133
动力特性计算时间(s)	2	2493	21	181

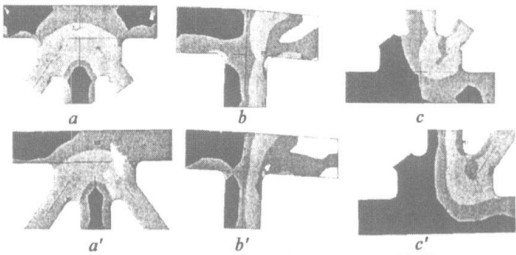


图 12 子结构模型和壳单元模型计算的局部热点应力对比

4 模拟结果分析

由上述建模和模型验证过程可见,四种不同的建模方法中,如果要进行结构的整体动态特性分析,四种模型都能够胜任。如果要进行结构响应分析,那么用不同的模型可以有不同的结果和作用。全梁单元有限元模型可以得到结构整体的应力结果,但得不到局部应力信息;全壳单元模型可以得到一些局部应力信息,但是单元数目和节点数目很大,对于实际的大跨桥梁结构而言,如果全部用壳单元建模且单元的特征尺度达到毫米级,那么仅仅一个长 15m 的钢箱梁标准段的有限元单元数目就将达到 35,000,000 之巨! 因此,对于实际的大跨桥梁结构是不可能这样采用全壳单元来建立结构的有限元模型;约束方程模型同全壳单元模型相比,虽然可以减少相当数量的单元数,但是计算效率并没有提高;用子结构方法建立的有限元模型不仅可以得到整体信息,还可以得到局部焊接细节部位的信息,而且计算效率也大大提高。

对于大型复杂结构如一个主跨达到千米以上的大跨桥梁结构,如果和本文中采用子结构方法或多点约束方程方法建立的有限元模拟方法类似,在桥梁结构的局部部位模拟达到局部焊接细节部分的有限元单元特征尺寸为毫米级,则采用本文方法建立的有限元模型实际上已经是一个结构多尺度有限元模型。

5 结论

本文研究了考虑局部细节特性的有限元模拟方法,以大跨桥梁结构钢箱梁纵向加劲桁架的缩尺模型为实验平台,分别采用子结构方法和约束方程的方法来建立包含局部细节特性的多尺度有限元模型并进行动力特性和静力响应计算分析,然后和传统全梁和全壳单元有限元模型计算结果以及实验实测结果对比,结果表明:

1. 用子结构和约束方程方法建立的有限元模型在整体动力特性和整体部位应力计算的结果和传统全梁全壳单元模型计算结果吻合良好,而且和全壳单元模型局部热点应力计算结果也一致,所以说用子结构和约束方程方法建立的有限元模型可以在无需进行二次分析的基础上进行大型复杂结构如大跨桥梁结构等的整体动力特性和静动力响应分析,而且还可以得到局部焊接细节处的信息,进行局部焊接细节处的特性分析,区别考虑焊缝和母材等不同几何、材料属性对局部应力的影响。对于大跨桥梁来说可以用此方法建立多尺度有限元模型来进行局部热点应力分析。

2. 约束方程方法建立的有限元模型计算效率比子结构模型要低一些,故相比之下,用子结构方法建立的有限元模型更加适合大型复杂结构的健康监测、损伤分析的需要。

3. 有限元模型计算和实验实测值之间还存在一定的误差,这主要是由于模型和实物之间存在一些无法精确模拟的因素,所以本文建立的多尺度有限元模型还需要进一步修正,关于模型修正部分的内容笔者将另文给出。

参考文献

[1]ASCE,The state of art in structural identification of constructed facilities·A report by the ASCE committee on structural identification of constructed facilities,Edited by S·W·Doebling and C·R·Farrar,June 1999  
[2]Zong Zhou-hong,Wang T L,Huang D Z,Zheng Zhen-fei.State of the art report of bridge health monitoring[J].Journal of Fuzhou University (Natural Science)2002,30(2):127-152  
[3]陈淮,郭向荣,曾庆元.大跨度斜拉桥动力特性分析[J].计算力学学报,1997,14(1):57-63  
[4]苏成,韩大建,王乐文.大跨度斜拉桥三维有限元动力模型的建立[J].华南理工大学学报,1999,27(11):51-56  
[5]朱宏平,唐家祥.斜拉桥动力特性分析的三维有限元模型[J].振动工程学报,1998,11(1):121-126  
[6]夏品奇,James M W & Brown John.斜拉桥有限元建模与模型修正[J].振动工程学报,2003,16(2):219-223  
[7]李兆霞.大跨桥梁结构以健康监测和状态评估为目标的有限元模拟[J].东南大学学报,33(5):562-572  
[8]周太全.桥梁构件局部热点应力分析及其疲劳损伤累积过程模拟[D].[博士学位论文].南京:东南大学土木工程学院,2003  
[9]王勖成,邵敏.有限元方法基本原理与数值方法[M].北京:清华大学出版社,1988年9月