

# 钢桁架模型实验研究的分析与设计\*

殷爱国, 李兆霞

(东南大学 土木学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**从桥梁结构多尺度损伤有限元模拟的研究需要出发,结合桥梁工程项目背景,利用相似模型实验的理论、方法,对桥梁结构中包含焊连接细节的钢桁架结构相似模型试样的设计、制作安装和实验方案等方面进行了研究;并在对拟实验的钢桁架模型试样进行初步有限元分析的基础上,确定了实验研究的载荷工况和测试方案。

**关键词:**纵向加劲桁架;模型实验;有限元分析

**中图分类号:** TU311.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-5322(2005)03-0065-04

大量的分析表明,结构构件的局部缺陷、损伤和疲劳累积,是结构破坏、失去承载能力的主要因素。用实物进行全尺度模型实验存在诸多困难或实物尚未存在(设计中的构筑物);运用有限元进行数值模拟计算,对计算机的计算速度和容量也提出了很高的要求,一般难以满足。为了解决这个问题,运用有限元工具建立结构全尺度和局部损伤细节尺度模型(即多尺度模型),为了修正多尺度有限元模型、验证多尺度模型间的衔接理论,运用将长度、力、时间等因素缩小了的相似模型进行实验,提供一些实测信息,对模型进行修正和验证。模型实验和有限元数值计算相结合、两者相辅相成是一种有效的分析方法。

本实验的研究和工程背景是香港青马大桥和润扬大桥健康监测系统,并得到国家自然科学基金项目和江苏省自然科学基金项目的资助。本课题前期的一些理论研究以青马桥为背景,得出了全桥三维结构有限元模型和关于桥梁构件名义应力的计算成果,对本文所述的实验内容有很强的指导意义。但是,为了进一步进行结构的损伤分析,尤其是分析发生于桥梁结构焊连接细节局部应力集中区域的初期损伤,这些已经取得的成果是远远不够的,需要进一步研究能够反映桥梁结构焊连

接细节区域的局部应力集中特性和损伤特性的有限元模型并通过实验研究加以修正和验证。目前在大跨度桥梁的钢箱梁结构构造方面,大量采用各种焊连接构件,其中比较典型的是钢桁架结构,因此,以包括大量焊接点的钢桁架结构作为局部应力与损伤特性模拟研究的对象,对于深入研究重要桥梁结构的损伤过程模拟,具有十分重要的意义。

## 1 实验目的、内容及模型设计

### 1.1 实验的目的

本项实验研究的目的定位于:通过在包含桥梁结构焊连接细节的钢桁架结构相似模型上进行简单特殊荷载下的动力特性和动力响应实验,进行此类模型结构的参数识别和模型验证工作;通过钢桁架结构失效过程实验比较结构损伤、失效行为仿真分析与追踪失效路径的模拟计算的结果;用实验测试结果比较各种多尺度有限元模型衔接方式和衔接区域的处理效果<sup>[1]</sup>。

### 1.2 实验内容

根据上述要达到的实验目的,本项实验研究的内容主要有以下方面:

①特殊荷载下的结构动力响应实验;测试模

\* 收稿日期:2005-06-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50278017)。

作者简介:殷爱国(1977-),男,河南淮阳人,东南大学在读硕士研究生。

型结构在某一边界条件下的固有频率、振型等模态参数,为接下来的模型修正和验证提供实验依据。

②模拟特定载荷下的结构静动力响应实验:通过一些精确的测试手段,对于模型的关键部位或重点考察部位的应力场分布及应力值进行测试和分析,对于一些包含焊接缺陷和预制损伤区域应力分布要仔细测试,分析损伤对于应力分布的影响、计算应力集中系数。用这些测试信息对比多尺度有限元模型的计算结果,进一步具体指导模型的修正和验证。

③结构失效过程实验:模拟一定的边界条件和荷载工况,通过结构失效过程实验的结果比较整体的和局部的损伤分析与结构失效行为仿真分析和追踪失效路径的模拟计算的结果。

④模拟工作载荷下的动力响应实验:通过模拟工作载荷下的结构响应监测结果指导结构损伤关键构建和损伤细节识别工作;作用在实验结构上的载荷应根据相似理论模拟实际大跨结构上荷载。

### 1.3 试样设计

针对上述研究需要确定的实验模型为青马大桥纵向加劲桁架典型标准段的 1:5 缩尺模型,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;在模型加工过程中,焊缝为主要工艺,也是重点控制工序,焊缝的质量对结构的局部、整体性能硬性较大,故在施焊期间采取了大量措施控制由于受热引起的变形、损伤,如在特制的加工平台上放置夹具,先拼接要施焊的构件,通过点焊先固定其相对位置达到减少变形的目的;对于很长的满焊缝,采取合理的冷却措施。

## 2 有限元初步分析

为了设计实验的加载工况和测试方案,需要首先对上述相似模型试样进行有限元分析,以确定各临界载荷和加载范围。由于该试样相对于全桥结构模型属于局部模型范畴,在对本实验模型划分单元时单元特征长度取为 5~10cm,单元采用 Beam188 和 shell63。建立的有限元模型如图 1 所示。进一步还计划建立其多尺度有限元模型,拟采用子结构和子模型两种手段处理。在试样的有限元分析过程中,对试样的边界条件采取了不同的方案处理,通过有限元计算得到了试样

的动力特性,应力分布、危险部位的理论值,为测试方案的制定提供了参考依据。表 1 给出边界固定条件下试样的前 10 阶频率计算结果。

表 1 4 个支撑端点完全固定的前 10 阶频率

Table. 1 Pre-ten Frequency, Boundary Fixed

MODE	FREQUENCY(HERTZ)
1	86.39
2	120.47
3	132.84
4	157.03
5	159.84
6	159.99
7	170.00
8	216.54
9	262.01
10	267.58

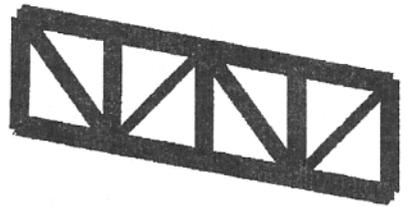


图 1 钢桁架试样的有限元模型

Fig. 1 Finite Element Model of Tested Truss

## 3 测试方案设计

### 3.1 实验加载工况设计

根据实验目的,实验内容和有限元分析的结果,制定了如下加载方案:

方案①:动力特性测试,加一冲击荷载根据动力响应计算各阶模态频率、振型等参数。特殊载荷下的结构动力响应实验。

方案②:静力响应测试,逐级加载,测试热点应力分布。局部热点应力分析;纵向加劲桁架细节的热点应力区域为对角斜撑、上下弦杆及盖板处的焊连接部位。在计算结果的基础上,进一步确定这些焊接构件内的名义应力和相应的焊接区域热点应力之间的关系,得到相应的应力集中系数<sup>[3]</sup>。施加集中荷载和均部荷载两种荷载形式。

方案③:动力响应测试,施加低周疲劳荷载,进行低频疲劳实验<sup>[4]</sup>。将结构失效实验过程的观测结果与结构损伤、失效全过程仿真计算的结果进行对比分析。观测一个加载周期内的应变变化情况,采用动态应变仪测出单个加载周期内应变

变化曲线, 得到一定循环次数下的弹性模量。在根据弹模变化与损伤的关系, 计算疲劳实验过程中试件的损伤, 从而研究焊接构件的疲劳失效行为<sup>[5]</sup>。

### 3.2 实验测试方案设计

#### 3.2.1 实验设备

**加载设备:** 集中载荷采用实验机和千斤顶相结合, 均布载荷利用特制的气囊施加。

**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。

**动态测试设备:** 加速度传感器, INV306D 智能信号采集处理分析仪, DELL 手提电脑, Dp730 数据采集及分析软件。

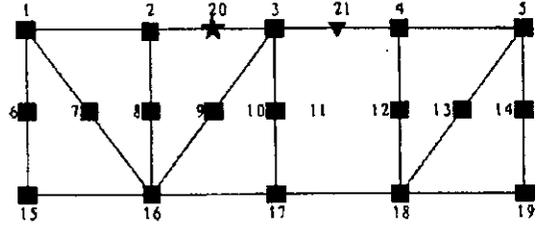


图 2 模态测试测点布置

Fig. 2 Detecting Spot Placement of Modal Test

■—测点或响应点位置(编号:1-19)

★—参考点位置(编号:20)

▼—敲击点位置(编号:21)

#### 3.2.2 测区布置

根据有限元计算结果和模型修正所需信息, 对以下标注区域的静动力分布规律及其区别进行重点研究。

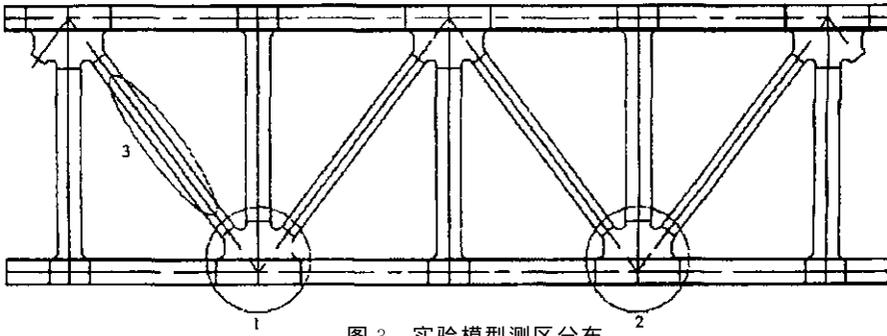
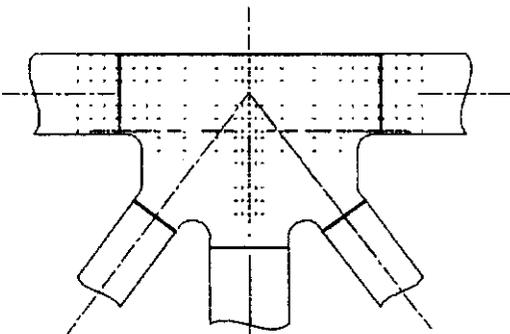


图 3 实验模型测区分布

Fig. 3 Detect Area Placement of Test Model

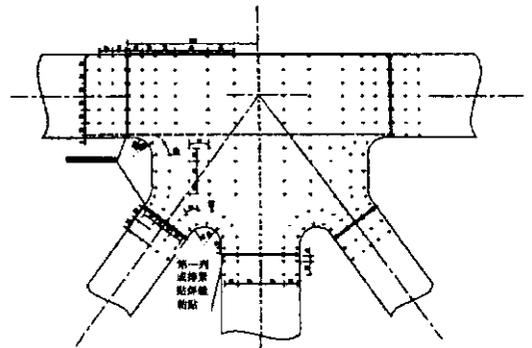
各测试区域中应变片布片方案示意图如下图所示:



共计 193 个应变片

图 4 测区 I

Fig. 4 Detect Area I



共计 281 个应变花

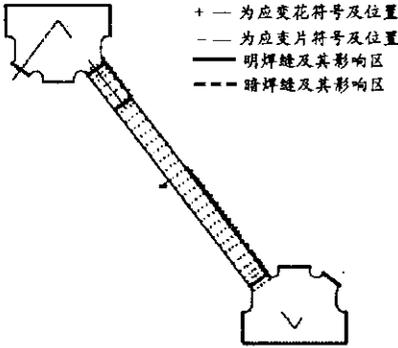
图 5 测区 II

Fig. 5 Detect Area II

## 4 结语

以现在的测试技术和一般计算机能力, 对于局部结构构件的应力状况还很难准确测量和精确计算, 通过本多尺度模型实验的研究为解决这方

面的问题将提供一些可行的途径, 这在大跨桥梁结构中显得尤为重要。所有这些实验研究对于桥梁整体性能的分析与验证、完善健康监测系统的一些理论会有很大的帮助, 但真正把这些成果运用于实际监测缺陷的存在、损伤的发生和疲劳的



共计 85 个应变片,80 个应变花  
注:所标示测区均为双面粘贴应变花或应变片

图 6 测区三

Fig. 6 Detect Area III

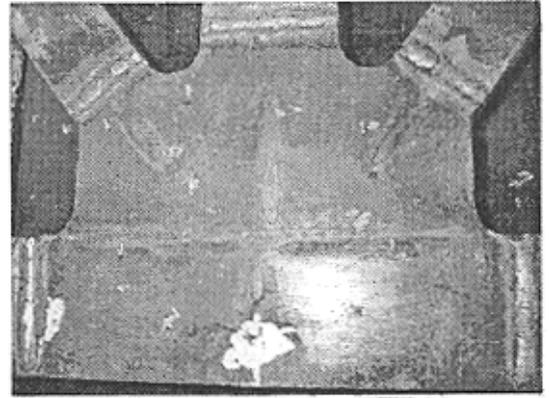


图 7 特殊节点照片

Fig. 7 Picture of Special Node

累积,还有很多工作要做,但通过这一局部模型的研究可对整体结构全尺度提供一些借鉴和方法。

按照本文研究得到的对桥梁纵向桁架结构模型进行实验研究的方案,探讨在桥梁结构多尺度模型修正和验证过程中所需的实验信息,实验手

段和实施方法,预计将取得一定的阶段性成果。由于实验模型加工费时,实验的复杂性决定了需进行充足的准备工作和时间的关系,这项实验研究的实施正待进行,关于实验实施后的研究成果将另文给出。

参考文献:

[1] 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]. 南京:东南大学土木工程学院 2003.  
 [2] 焦馥杰. 焊接结构分析基础[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1991.  
 [3] 张如一,陆耀栋. 实验应力分析[M]. 北京:机械工业出版社,1981.  
 [4] 徐玉兵. 桥梁焊接构件焊趾附近的应力集中和疲劳特性实验研究[D]. 南京:东南大学土木工程学院 2003.  
 [5] 桂国庆. 钢桥钢梁整体节点疲劳试验研究[J]. 工程力学, 2001,(8): 1-5.

## The Design and Analysis of Experimental Study of Steel Truss Sample

YIN Ai-guo, LI Zhao-xia

(College of Civil Engineering, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China)

**Abstract:** This paper aimed to determine the method and approach of experimental study of steel truss sample for the purpose of multi-scale modeling of bridge damage. With Tsing ma bridge as the background, the design and experiment approach of steel truss including welded details in bridge structure were made by means of truss modeling with similarity theory. Based on the present research and finite element analysis, the load mode and testing scheme were confirmed.

**Keywords:** Longitudinal truss; model test; finite element analysis