

基于环境振动试验的系杆拱桥模态参数识别

戴恩彬^{1,2}, 廖 婧², 任伟新³, 王宁波³

(1. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205; 2. 和天(湖南)国际工程管理有限公司, 湖南 长沙 410205; 3. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410018)

摘要: 对桥梁开展环境振动测试, 可以获得桥梁的模态参数如固有振型、自振频率以及阻尼比。桥梁性能评定、损伤识别、健康检测和基准有限元模型建立以这些参数为主要依据。将实测的加速度数据进行模态分析, 获得桥梁的自振频率和振型, 并与有限元模型理论计算结果进行对比分析, 结果表明: 通过试验得到的桥梁实际自振特性与有限元模型理论计算结果吻合良好, 为以后桥梁定期检测、状态评估和日常养护提供基准参数。文章内容可为同类型桥梁提供参考。

关键词: 环境振动测试; 模态分析; 参数识别

中图分类号: U448.22⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)02-0024-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.02.019

Modal parameter identification of tied arch bridge based on environmental vibration test

DAI Enbin^{1,2}, LIAO Jing², REN Weixin³, WANG Ningbo³

(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China;

2. Hetian(Hunan) International Engineering Management Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China;

3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410018, Hunan, China)

Abstract: The environmental vibration test of the bridge can obtain the dynamic (modal) parameters of the bridge structure such as natural vibration frequency, damping ratio and natural vibration mode. These parameters are the base of bridge damage identification, performance evaluation, health inspection and benchmark finite element construction. The measured acceleration signal is subjected to modal analysis to obtain the natural frequency and vibration mode of each step of the bridge structure. The test data is collated and analyzed, and the finite element calculation results are analyzed and compared to understand the actual dynamic characteristics of the structure, which can provide benchmark parameters for bridge maintenance, state assessment and health detection in the future.

Key words: environmental vibration test; modal analysis; parameter identification

改革开放以来, 我国日新月异的交通为桥梁建设带来了良好的发展机遇, 中国桥梁以巨大的规模和飞快的建设速度向前发展。由于桥梁结构长期处于车辆、风等动荷载的作用下, 结构疲劳效应显著。为保证交通的快速、安全, 及时发现和消除在役桥梁安全隐患至关重要。为了解桥梁

在荷载作用下的实际工作状态, 综合分析判断桥梁结构的承载能力和使用条件, 对桥梁进行定期常规检测、静载试验、动载试验等是主要手段。

传统的检测方法一般可以对桥梁的外观及部分结构特性进行监测, 对桥梁局部关键结构构件、节点可以进行较为合理的损伤判断, 然而难以全面反

收稿日期: 2023-10-15

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30840)

作者简介: 戴恩彬(1985—), 男, 高级工程师, 从事路桥设计与检测监测相关工作。

映桥梁的整体健康状况, 对于桥梁结构的安全程度、剩余寿命难以做出系统的评估。国内外学者普遍认同并致力于研究的无损检测方法是结合系统识别、振动理论、振动测试技术、信号采集等跨学科技术的试验模态分析方法^[1]。试验模态分析方法是通过分析桥梁结构固有频率、阻尼和模态振型等动力特性, 进而诊断桥梁结构损伤位置、程度。由于结构动力特性只与其本身固有特性有关, 反映了结构的整体性态, 因此试验模态分析方法具有全局损伤诊断能力, 可对结构做出整体性安全评定。桥梁结构整体健康监测系统的研究有望改变过去不能及时发现结构损伤的被动局面, 可以及时地了解结构的整体工作状态, 是以后的发展方向之一^[2]。

对桥梁开展环境振动测试, 可以获得桥梁的模态参数如固有振型、自振频率以及阻尼比^[3]。桥梁性能评定、损伤识别、健康检测和基准有限元模型建立以这些参数为主要依据。环境激励下桥梁动载试验具有如下特点: 1) 可以不用中断桥梁的正常运营使用, 省时方便; 2) 不需要昂贵的激振设备, 直接采用桥梁正常使用时车辆荷载、人群荷载、风荷载及其组合等作用于桥梁上的自然或环境激励, 费用较低; 3) 在输入情况未知的情况下, 只测试桥梁动载响应数据, 模态参数识别过程是基于只知输出的系统识别; 4) 通过桥梁结构在正常运营时的振动响应数据直接识别得到的模态参数更加贴合实际的边界条件和工作状态; 5) 特殊的数据处理技术和参数识别方法应用较多, 主要是因为环境振动响应数据噪声影响大、振幅小、数据量大、随机性强。

1 工程概况

湖南省大源渡航电枢纽距衡阳市中心城区 32 km, 位于湘江干流, 是湘江衡阳市衡山县至岳阳市城陵矶首个以电养航的航电枢纽工程。渠化衡阳至大源渡航道长度为 62 km, 改善航道长度为 120 km。大源渡航电枢纽工程是“九·五”期全国

重点工程项目、湖南省交通行业实施“航电结合、以电促航”的试点, 也是我国内河航运建设首批申请到世界银行贷款的项目。大源渡航电枢纽项目总投资 20.97 亿元, 位于湘江下游的衡山县、衡东县交界处, 主要包括船闸、电站、泄水闸、坝顶公路桥和大坝 5 个部分。其中船闸布置在湘江左岸, 设计年通过能力 1 200 万吨, 闸室有效尺度为 180 m × 23 m × 3 m (长 × 宽 × 门槛水深); 电站位于右岸, 总装机容量 120 MW, 采用灯泡贯流式水轮发电机组, 单机容量 30 兆瓦, 共 4 台, 多年平均年发电量 5.85 亿千瓦时。

系杆拱桥属于无推力拱式组合体系桥, 由于是外部静定结构, 兼有拱桥的较大跨越能力和简支梁桥对地基适用能力强的两大特点, 所以当桥面高程受限而桥下又要求保证较大的净空时, 无水平推力的拱式组合体系桥梁是较优越的桥型。国内曾在多地修建过 50 ~ 75 m 跨径的钢筋混凝土无推力拱式组合体系桥梁, 跨越运河和宽浅河流等。

大源渡枢纽跨船闸上游引航道拱桥是湘江(衡阳至株洲)航运工程的组成部分, 该大桥跨径组成为 (20 + 75 + 20) m, 桥梁全长为 132 m。主桥采用 75 m 下承式预应力钢筋混凝土系杆拱桥; 引桥采用 20 m 钢筋混凝土简支箱梁, 单箱双室。桥面宽度: 8.0 m = (0.5 + 7.0 + 0.5) m (护栏 + 机动车道 + 护栏)。

主桥拱肋线型采用二次抛物线, 材料为钢筋混凝土, 净矢跨比 1/6。系杆纵向预应力采用 56 根 $\varnothing 5$ mm 高强钢丝, 配套相应锚具。拱桥柔性吊杆采用 12 $\varnothing$ s15.2 mm 高强度低松弛钢绞线。

桥墩采用双柱式钢筋混凝土墩身, 两根 $\varnothing 2.0$ m 钻孔灌注嵌岩桩基础, 持力层为砂质板岩。桥台为浆砌片石重力式 U 型桥台。

设计荷载: 汽—20 级, 验算荷载挂—100 级, 人群 3.5 kN/m²。

桥型布置图如图 1 所示。

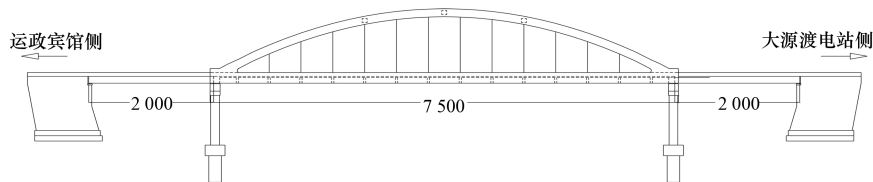


图 1 桥型布置

2 模态参数识别方法

对整体来说,系统的模态模型可以用来描述振动结构响应与激励的关系;就具体的一个结构来说,目标在于怎么寻求结构模态模型的相关参数,也称之为模态参数识别。试验模态参数识别是振动信号处理的一个重要环节,其主要任务是通过试验得到的振动响应数据,识别结构的振动参数,包括自振频率、振型、阻尼比、模态刚度和模态质量等。目前主要的常用模态参数识别方法有时域法、频域法和时频法等^[4]。

试验模态参数识别的频域法是指在频率域内识别结构的模态参数。频域识别法的应用与研究时间相对久远,是随傅立叶变换的起源和发展而推广起来的。频率响应函数表示的是测量点的响应和激励力之间的关系,其关系亦可以用模态参数来表述。各个频率响应函数能通过测量获得,可以将其表示为随频率而变化的频率响应函数曲线。由此实测所获得的频率响应函数曲线,就是模态参数识别的依据。最早的频域识别方法是图解法。对于模态耦合较小的情形,结构的自振频率、振型和阻尼比通过实测数据经傅立叶变换得到的频率响应函数曲线便可以粗略地识别得到。之后,基于频率响应函数模态参数方程的基本数学模型又陆续得到推广,发展了基于线性或非线性最小二乘法的多种模态参数识别的频域方法。主要有单模态识别的差分法、最小二乘圆拟合法;多模态识别的 Levy 法、非线性加权最小二乘法、正交多项式拟合法、直接偏导数法等。频域识别方法的优点首先是直观,通过实测和变换得到的频率响应函数曲线便可直观看出模态参数的概略估计值和模态的分布情况,其中估计值可以作为部分频域方法需要输入的初始值;其次是噪声的影响较小,采用频域平均技术处理实测频率响应函数的做法极大地减小了噪声的不利影响,方便解决模态定阶的问题^[3-5]。

试验模态参数的时域识别法不需要将所测得响应的时域数据或者激励的时域数据通过傅立叶变换到频域中,而是在时域中直接进行参数识别。时域法的应用与研究比频域识别方法要晚,是随着电子计算机的应用普及而在近些年发展起来的

新技术新方法。频域识别方法的一些缺陷时域识别法能够克服。尤其是对复杂大型结构,如高层建筑物、桥梁、大坝以及船舶、飞机等受到风、浪以及地球脉动的作用时,它们在运营过程中承受的作用和荷载很难实际测量,不过响应信号不难测得,因此利用振动响应的时域信号直接进行参数识别的意义是不言而喻的。目前基于时域的模态参数识别方法主要有特征系统实现法(ERA)、最小二乘复指数法(LSCE)、IDT 方法、多参考点复指数法(PRCE)、ARMA 时序分析法等。时域识别方法不需要将测试数据在时域和频域间变换,这就避免了由于数据变换(FFT 变换)而导致的截断误差(如漏泄等)。但时域方法也有它的缺点,如可能出现虚假模态、精度较低等^[6-7]。

上述方法均具有各自的优点,基于系杆拱桥健康监测的重要性以及考虑到随机子空间方法和峰值拾取法均能适用于桥梁的实时健康监测,应用前景广阔,本文模态参数识别采用随机子空间方法和峰值拾取法。

3 环境振动试验

3.1 试验目的

为了解湘江(衡阳至株洲)航运工程跨船闸上游引航道拱桥在荷载作用下的实际工作状态、检验判桥梁整体的静力和动力性能是否满足设计要求和设计要求,综合分析判断桥梁结构的承载能力和使用条件,采用大型空间有限元结构分析通用软件 ANSYS 建立全桥有限元分析模型,进行了静力和动力计算分析。根据提交的汽车静动载试验和吊索索力测试方案,对湘江(衡阳至株洲)航运工程跨船闸上游引航道拱桥现场进行了汽车静载试验、环境振动试验和吊索索力测试。

对桥梁开展环境振动测试,可以获得桥梁的模态参数如固有振型、自振频率以及阻尼比。桥梁性能评定、损伤识别、健康检测和基准有限元模型建立以这些参数为主要依据。将实测的桥梁振动加速度数据进行模态分析和参数识别,获得桥梁的自振频率和振型。并与桥梁的有限元模型理论计算结果进行对比分析,得到桥梁的实际动力参数,为以后桥梁状态评估、养护、有限元模

型修正和健康检测提供基准数据。

3.2 试验仪器设备

动态测试仪器采用德国 IMC 集成测控有限公司的信号自动采集处理和分析系统: 美国 SDI 公司的电容微机电式 (MEMS) 加速度传感器, IMC 便携式通用型数据采集系统, DELL 笔记本电脑, 数据处理软件。

3.3 测点布置

测点位置及数量的布置原则是, 所测数据经过参数识别能够得到桥梁前几阶固有振型及频率。

该桥环境振动测试共分 4 个测试组 (setup), 每组 8 个测试点, 其中 1 个为参考点, 具体位置为每根吊杆底面和拱脚处, 测点传感器布置如图 2、3 所示, 具体测站如表 1 所示。

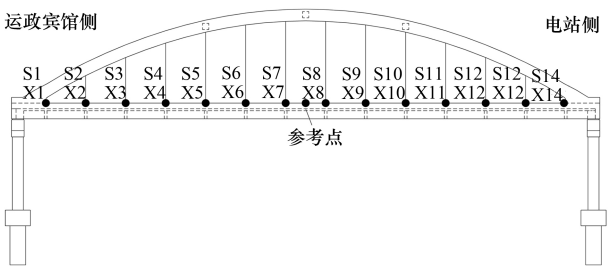
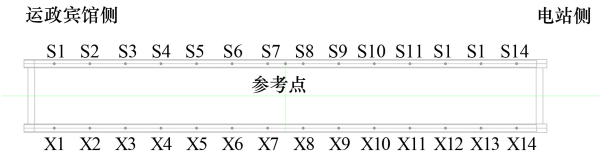


图 2 测点布置 (立面) (S 表示上游, X 表示下游)



注: · 表示横向、纵向中、竖向加速度传感器布置

图 3 测点布置 (平面) (S 表示上游, X 表示下游)

表 1 测站编号

分组	测站编号	备注
1	R1, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7	
2	R1, S8, S9, S10, S11, S12, S13, S14	R1 测站
3	R1, X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7	为参考点
4	R1, X8, X9, X10, X11, X12, X13, X14	

3.4 测试项目

根据桥梁振动特点, 并结合有限元模型初步计算结果, 确定主要测试项目为桥面两侧各测点纵横竖 3 个方向的加速度响应, 从而可通过参数识别得到桥梁前几阶固有振型及自振频率。

3.5 试验过程

桥梁振动参数的测试, 通过在桥面布置纵横竖三向加速度传感器, 桥梁结构的三向振动数据

由加速度传感器拾取, 经信号放大器放大后由信号采集仪记录。试验采样时间为 20 min, 采样频率 100 Hz。为最大程度的减小测试偏差, 共采样 3 次, 每次间隔 10 min。

4 试验结果与理论分析比较

根据实测的加速度数据, 进行频谱分析、模态分析和参数识别, 获得桥梁的模态参数如固有振型、自振频率以及阻尼比。其中, 模态分析以随机子空间方法为主, 峰值拾取法为辅^[8]。

采用大型空间有限元结构分析通用软件 ANSYS 建模和分析^[9]。模型主要以板单元、杆单元和空间梁单元建立, 用板单元模拟桥面板; 用空间梁单元模拟桥梁拱肋、横撑等; 用杆单元模拟桥梁吊杆、系杆等。

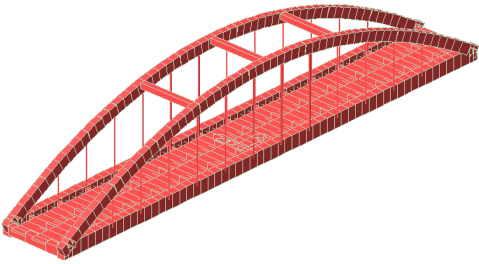


图 4 全桥空间有限元模型

根据建立的有限元模型, 运行模态分析, 得到桥梁的自振频率和振型。同时, 由实测的加速度信号, 识别得到桥梁前 5 阶振型及频率, 理论计算频率与实测频率结果的比较如表 2 所示; 理论计算振型与实测振型结果的比较如图 5 ~ 14 所示。

表 2 各阶自振频率及振型

项目		频率/Hz	周期/s	振型
第一阶	实测	2.201	0.454	竖向反对称
	理论	1.811	0.552	竖向反对称
第二阶	实测	4.136	0.242	一阶扭转
	理论	4.030	0.248	一阶扭转
第三阶	实测	5.116	0.195	竖向对称
	理论	4.467	0.224	竖向对称
第四阶	实测	7.004	0.143	反对称扭转
	理论	5.789	0.173	反对称扭转
第五阶	实测	7.876	0.127	二阶竖向反对称
	理论	7.146	0.140	二阶竖向反对称

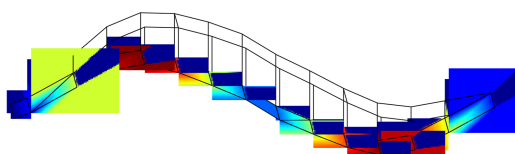


图5 第一阶实测振型（竖向弯曲）

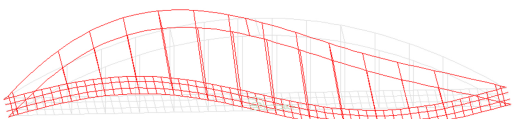


图6 第一阶理论计算振型（竖向弯曲）

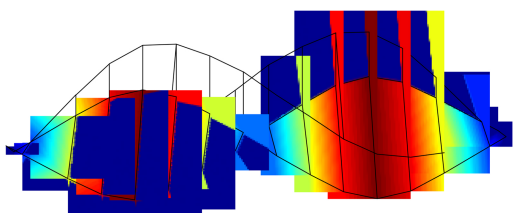


图7 第二阶实测振型（扭转）

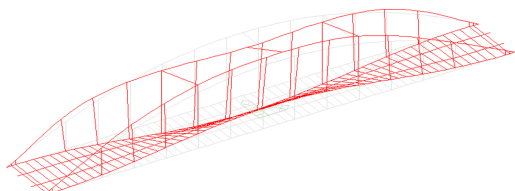


图8 第二阶理论计算振型（扭转）

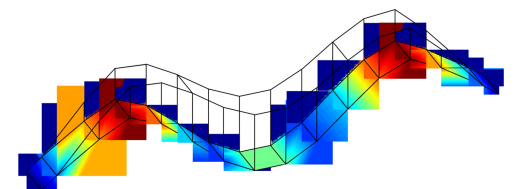


图9 第三阶实测振型（竖向弯曲）

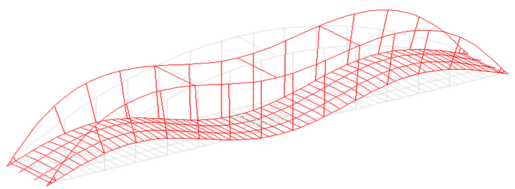


图10 第三阶理论计算振型（竖向弯曲）

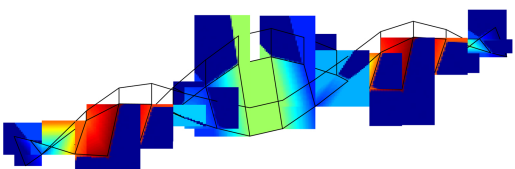


图11 第四阶实测振型（扭转）

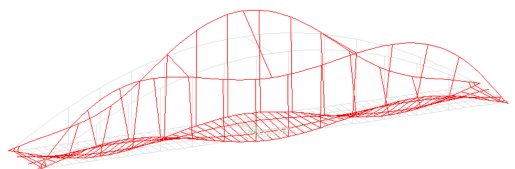


图12 第四阶理论计算振型（扭转）

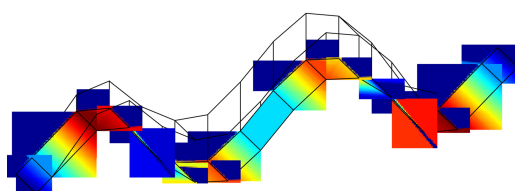


图13 第五阶实测振型（竖向弯曲）

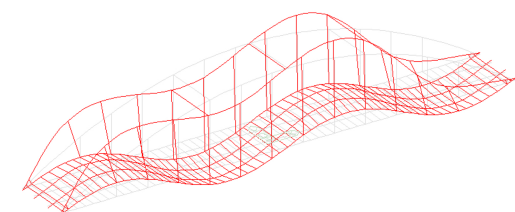


图14 第五阶理论振型（竖向弯曲）

从试验的结果来看,有限元计算的部分模态没有识别出来,出现了遗漏的情况,这也表明这些模态较弱,难以被检测到。一些文献中采用施加部分人工激励得到了较多的模态,然而这些模态并不能反应桥梁实际工作特点,桥梁实际运营中这些模态并没有被激励起来,仅由环境振动实测数据识别出的这些模态才能反应出桥梁实际运营的状态,这也可以为桥梁实际运营时的振动控制提供很好的依据。空间有限元模型计算结果与实测的各阶频率及相应振型吻合较好,实测频率值比有限元模型计算结果稍大,这也反映出ANSYS建立的有限元模型与实际模型存在一定的差异。从建模的过程分析,该类桥梁结构动力参数的主要影响因素:1)桥梁边界条件;2)拱桥的结构型式及跨度;3)主梁的结构形式;4)桥面系结构类型;5)拱桥吊杆索力;6)材料特性如混凝土弹性模量等;7)构件截面特性如构件面积及惯性矩等。基于设计图纸和规范参数建立的初始有限元模型,由于实际材料参数的变异以及施工导致的尺寸偏差,实际桥梁结构的动力参数必然有别于设计值。这样实测模态分析结果可指导初始有限元模型进行修正,建立较完善的有限元模型。同时也可建立桥梁的指纹技术档案,为以后开展该桥健康监测提供可靠的依据,因此桥梁环境振动试验具有重要的工程意义。

5 结 语

桥梁固有模态参数是桥梁性能评定、损伤识别、健康检测和有限元模型修正的主要依据。本

文结合大源渡航电枢纽跨船闸上游引航道拱桥工程实例, 对其进行空间有限元模型建立和环境振动试验及模态参数识别, 得出结论如下。

(1) 在环境自然激励下, 桥梁的实测振动参数(频率和振型)与有限元模型计算结果吻合较好; 桥梁实测频率值比有限元模型计算结果大, 反映了桥梁实际刚度大于设计值。

(2) 实测结果与有限元模型计算值吻合较好, 也证明了试验方法的可行性和试验结果的准确性。

(3) 实测的桥梁自振参数, 是今后桥梁养护、状态评估和健康检测的基准数据。

(4) 对既有桥梁开展环境振动试验具有可靠、简便、不中断桥梁正常通行等优势, 是桥梁动力参数测试的有效手段。

参考文献:

- [1] RYTTER A. Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures[D]. Denmark: Department of Building

Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, 1993.

- [2] 余天庆, 陈开利, 彭苗. 桥梁结构的损伤现代检测与评估. 世界桥梁, 2004(2): 52-55.
- [3] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社知识产权出版社, 2006.
- [5] 曹树谦, 张文德, 萧龙翔. 振动结构模态分析: 理论、实验与应用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.
- [6] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [7] 戴恩彬. 应变模态分析及参数识别[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [8] 任伟新, 林友勤, 彭雪林. 大跨度斜拉桥环境振动试验与分析[J]. 实验力学, 2006(4): 418-426.
- [9] 张立明. Algor、Ansys 在桥梁工程中的应用方法与实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

(上接第 17 页)

度的影响, 对于该立柱模型, 最大应力值的模拟结果误差较大。

(4) 简化统一耦合方法综合了以上两种耦合方式的优点, 在 3 种典型受力工况下均可以达到最接近整体建模模拟计算的数值结果, 即对最大应力值的模拟效果最好, 能够满足工程建模需要。

3 结论及建议

通过研究 C 型钢立柱的缀板连接方法, 说明了不同耦合连接情况下, 加劲小构件对主体大型构件的影响, 所得结论适用于主体构件的局部加强。

(1) 对比了不同建模方法对于缀板连接(即面-面绑定连接)的模拟效果, 基于已有工程经验可知, 整体建模的模拟方法最接近工程实际, 但其建模过程较为复杂且不能模拟不同材料的连接, 也不便于后续模型修改。

(2) 节点耦合连接方法适用范围广, 便于进行后续模型修改。根据模拟计算结果可知, 缀板与立柱耦合连接时, 由于缀板面积较小, 统一耦合的节点过多会造成缀板上的应力集中; 相对于节点统

一耦合, 节点两两耦合的连接强度会发生显著下降, 对立柱的加强作用减弱, 导致模拟结果失真。

(3) 综合以上两种耦合方法提出的简化统一耦合能够同时满足立柱和缀板的理想模拟结果。实际应用时, 应在保证加劲小构件对大构件加强作用基本不变的情况下, 适当减小小构件上的统一耦合面积, 避免产生应力集中。

参考文献:

- [1] 孙瀚青. 冷弯薄壁复杂卷边 C 形钢双肢缀板柱轴压性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [2] 胡启平, 韩璐. 带缀板的开口薄壁钢构件整体稳定分析[J]. 江西建材, 2015(9): 6-7.
- [3] 谭欣, 潘雨辰. 轴心受压格构式缀板与缀条柱选型对比研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 27-31.
- [4] 王翠琴, 刘忠, 张孝芳, 等. 方钢管混凝土柱-工字型钢梁节点受力性能的非线性有限元分析[J]. 桂林理工大学学报, 2011, 31(4): 558-563.
- [5] 郭相杰, 杨晓明, 韩孝坤, 等. 缀板式钢管混凝土组合柱框架有限元分析[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(3): 41-44, 50.