



International Association for Bridge
Maintenance and Safety China Group
国际桥梁维护与安全协会中国团组

Analysis of SHM Data
and Safety Evaluation for Large Span Bridges

田浩 马如进 邵吉林 著

大跨桥梁结构监测数据 分析与安全评估



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

大跨桥梁结构监测数据 分析与安全评估

田 浩 马如进 邵吉林 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

大跨桥梁结构监测系统数据分析工作日益受到重视。本书从海量数据梳理与分析、结构基淮有限元模型建立、结构抗力退化研究、基于监测数据的结构安全评估等方面,全面阐述了如何对大跨桥梁结构监测系统所获海量原始数据进行分析处理和结构安全评估。

本书可供从事桥梁设计、施工、管理及相关研究人员参考,也可供高等院校相关专业的研究生和高年级本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大跨桥梁结构监测数据分析与安全评估 / 田浩, 马如进, 邵吉林著. —北京:人民交通出版社股份有限公司, 2016. 7

ISBN 978-7-114-13151-6

I. ①大… II. ①田… ②马… ③邵… III. ①长跨桥—桥梁结构—监测系统—数据—分析 ②长跨桥—桥梁结构—监测系统—安全评价 IV. ①U448.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 144533 号

书 名: 大跨桥梁结构监测数据分析与安全评估

著 作 者: 田 浩 马如进 邵吉林

责任编辑: 曲 乐 卢俊丽

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 720 × 960 1/16

印 张: 14

字 数: 260 千

版 次: 2016 年 7 月 第 1 版

印 次: 2016 年 7 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13151-6

定 价: 45.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

序

国际桥梁维护与安全协会(International Association for Bridge Maintenance and Safety, 简写 IABMAS)成立于 1999 年,是一个致力于提升桥梁养护、安全和管理水平的国际性学术组织。该协会的宗旨为提升桥梁养护、安全和管理领域的国际交流与合作,增强理论与实践之间的沟通,促进技术发展和创新。自协会创建以来,通过主办和协办国际会议、技术论坛等活动,为桥梁管养相关领域的工程师、管理者和研究人员提供了一个相互了解和交流的平台,对促进该领域发展作出了积极贡献。

2002 年 7 月,由 IABMAS 组织召开的第一届桥梁维护、安全和管理国际会议(1st International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management)在西班牙巴塞罗那成功举行。此后,第二至第七届会议分别于 2004 年 10 月在日本京都、2006 年 7 月在葡萄牙波尔图、2008 年 7 月在韩国首尔、2010 年 7 月在美国费城、2012 年 7 月在意大利斯特雷萨、2014 年 7 月在中国上海召开。这一系列会议得到了各国日益密切的关注和积极的响应,与会人数逐渐增多,第七届会议与会人数超过 800 人。第八届桥梁维护、安全和管理国际会议将于 2016 年 6 月在巴西杜伊瓜苏举行。

为提升国内桥梁管养领域的学术联系,促进相关领域的工程师、管理者和研究人员的学术交流,促进国际交流,建立一个国际性的交流平台,由作者提议,经国际桥梁维护与安全协会同意,2012 年 4 月,在同济大学成立了国际桥梁维护与安全协会中国团组(IABMAS—China Group),并同期举办了第一届全国桥梁维护与安全学术会议。根据中国团组会议的决定,中国团组会议将每逢单数年份召开。2013 年 4 月,由重庆交通大学承办的第二届全国桥梁维护与安全学术会议在重庆召开;2015 年 5 月,由长安大学承办的第三届全国桥梁维护与安全

技术会议在西安召开。

本书是中国团组理事会单位——浙江省交通运输科学研究院下属桥梁维护与安全技术研究中心近五年通过常驻大桥一线管理现场,围绕大跨桥梁结构监测数据分析和结构安全评估问题开展的一系列研究工作的成果体现。本书中的相关研究成果已在数个大跨桥梁结构监测系统中予以应用,效果显著。



2016 年 3 月

前 言

20 世纪 80 年代以来,各国对防灾减灾工作日益重视,欧美、日本、韩国、中国香港等地率先提出“主动预防式”的结构健康监测理念,并先后在一些重要的桥梁上安装了健康监测系统,开始研究桥梁结构健康监测和养护技术,迅速成为国内外研究热点。随着桥梁投入运营时间的推移,实时的动态健康监测系统在桥梁全寿命期内将逐步积累大量的监测数据和图像信息,如何对这些不同历史阶段采集的数据进行有效提取、处理和分析利用,从而获得反映桥梁结构受力状态的代表性动、静力指标,并定期对桥梁的运营结构安全性进行评估,及时有效的为桥梁管养提供数据技术支持是结构监测系统亟待解决的问题。

本书是浙江省交通运输科学研究院承担的浙江省科学技术厅协同创新项目“基于监测大数据的跨海大桥结果安全评估方法研究”(项目编号:2015F50026)的主要研究成果。针对当前大跨桥梁结构监测系统所获海量原始数据缺乏实用高效的挖掘与分析工具的现状,重点开展海量数据自动实时读取、异常值判断与剔除、荷载—响应相关性、基于监测数据的结构安全评估框架、基准有限元模型建立、结构抗力退化等方面的研究工作,将结构健康监测系统产生的海量原始数据通过挖掘与分析转变成几十兆的有效结果数据,并可进一步对结构的静力、动力、疲劳受力状态和台风等特殊事件进行合理的分析与评估。

本书第一章由浙江省交通运输科学研究院邵吉林副总工撰写,第二章由浙江省交通运输科学研究院胡美工程师撰写,第三章由浙江省交通运输科学研究院胡美工程师、同济大学徐世桥博士研究生撰写,第四章由浙江省交通运输科学研究院田浩博士、同济大学马如进副研究员撰写,第五章由浙江省交通运输科学研究院田浩博士撰写。全书由浙江省交通运输科学研究院田浩博士负责统稿和校核。

本书其他参与人员还有晁春峰博士、徐建、张勇等。在本书的编写过程中,得到了国际桥梁维护与安全协会中国团组(IABMAS-China Group)的大力支持,在此表示感谢。书中部分内容引用了同行专业论著中的成果,在此对论著作者表示衷心感谢。

由于时间水平有限,书中难免存在错误或不足之处,欢迎读者批评指正,在此表示衷心感谢。

作 者

2016 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 桥梁健康监测系统概述	1
1.2 桥梁健康监测系统研究现状	4
本章参考文献	13
第 2 章 海量数据梳理与分析	18
2.1 数据库技术介绍	18
2.2 编程语言	22
2.3 软件体系结构	24
2.4 软件整体架构	26
2.5 工程应用实例	27
2.6 本章小结	38
本章参考文献	38
第 3 章 结构基准有限元模型	40
3.1 有限元模型修正的研究现状	40
3.2 有限元模型修正的理论基础	43
3.3 有限元模型修正常用方法	47
3.4 基于静(动)力桥梁有限元模型修正过程	53
3.5 工程实例 1:西堠门大桥	65
3.6 工程实例 2:金塘大桥	88
3.7 本章小结	115
本章参考文献	115
第 4 章 结构抗力退化	123
4.1 基于数学模型的抗力折减系数研究	123
4.2 基于工程经验的抗力折减系数研究	130

4.3 方法分析	134
4.4 工程实例 1:西堠门大桥	136
4.5 工程实例 2:金塘大桥	138
4.6 本章小结	139
本章参考文献.....	140
第 5 章 基于监测数据的结构安全评估	143
5.1 结构安全评估常用方法	143
5.2 结构安全评估系统设计思路	146
5.3 结构安全评估理论基础	150
5.4 工程实例 1:西堠门大桥	155
5.5 工程实例 2:金塘大桥	195
5.6 本章小结	212
本章参考文献.....	213

第 1 章 绪 论

近 20 年来,我国桥梁建设取得了令世人瞩目的成就,一批结构新颖、技术难度高的大跨径悬索桥、斜拉桥相继建成。截至 2015 年年底,已建、在建世界排名前 10 位的千米级悬索桥及大跨斜拉桥中我国各有 6 座以上,我国正由桥梁大国向桥梁强国迈进。然而,由于当时桥梁设计、施工、材料、体系缺陷等技术条件的限制,超载交通及结构安全监管手段的缺乏,以及“重建轻养”“被动事后”的桥梁监管养护方式,其中一些桥梁已无法满足现代大跨径缆索体系桥梁百年安全运营的要求。

20 世纪 80 年代以来,各国对防灾减灾工作日益重视,欧美、日本、韩国、中国香港等地率先提出“主动预防式”的结构健康监测理念,并先后在一些重要的桥梁上安装了健康监测系统^[1-6],开始研究桥梁结构健康监测和养护技术^[7],迅速成为国内外研究热点。随着桥梁投入运营时间的推移,实时的动态健康监测系统在桥梁全寿命期内将逐步积累大量的监测数据和图像信息,如何对这些不同历史阶段采集的数据进行有效提取、处理和分析利用,从而获得反映桥梁结构受力状态的代表性动、静力指标,并定期对桥梁的运营结构安全性进行评估,及时有效的为桥梁管养提供数据技术支持是结构监测系统亟待解决的问题。

1.1 桥梁健康监测系统概述

1.1.1 基本概念

土木工程领域的众多工程结构建成投入使用后的服役时间长达几十年,甚至上百年,而这些结构往往是关系到国计民生的重要建筑,如城市立交桥、高层建筑、大坝水库、发电站等,一旦这些建筑物在服役期间出现破坏,后果不堪设想。工程实际中通常采用科学合理的设计计算和准确安全的工程施工来保证结构的可靠性,但是由于这些工程的建设运营在空间和时间上的跨度都很大,会受到诸多因素的影响,如建设年代科学理论本身的缺陷和限制、施工技术的限制、施工误差以及使用环境或条件的改变等,从而造成工程

结构在完工后或运营一段时间后的实际状态和设计理论状态产生偏差。同时,工程结构在运营期间受到环境侵蚀、材料退化、荷载疲劳效应、损伤累积等因素的综合影响,其承载力及安全储备将不可避免的降低,从而导致发生突发事件的概率增大。为预防事故的发生,过去通常采用定期人工检测的方法来对结构的安全性能进行评估,但传统人工检测存在明显不足,如实时性差、整体性差、检测费用高等。

诸多影响工程结构安全的不利因素的存在,以及传统检测手段的缺陷,推动了结构监测技术的出现,并使其得到迅速发展。结构健康监测 (Structural Health Monitoring, SHM) 是指利用预埋或现场安装的、对结构安全无损的传感器元件,对结构在荷载作用下的响应,以及结构系统特性的变化进行测量,在数据分析基础上达到获得结构损伤或退化判断的目的。结构的监测与检测不同,检测是指对新建结构或者发生损伤的结构进行检查,判断结构目前的状态,是静态或某一时间点的;而结构监测则可以实时监控结构的运行状态,它把检测融合在其中,是动态和长期的。桥梁结构健康监测 (Bridge Structural Health Monitoring, BSHM) 是对桥梁包括荷载、位移、应力、应变、结构动力特性和环境条件如温度、风速等多参数的监测,其利用设置在桥梁关键部位的测试传感器,对桥梁在施工、运营阶段的安全状况进行实时、连续的监测,在对监测数据进行分析处理的基础上评估桥梁结构的安全状态,对潜在的危险进行预警,从而为桥梁的运营和管理决策提供依据。

1.1.2 主要组成

桥梁的结构健康监测系统,通常包括硬件和软件两大部分,一般可分为4个子系统,分别是传感器子系统、数据采集与传输子系统、数据处理与分析子系统以及结构状态评估子系统,各个子系统之间通过有线或者无线网络连接从而协同工作。

结构健康监测系统的的核心子系统是传感器子系统和结构状态评估子系统位于远程监控室中,传感器子系统和数据采集与传输子系统位于各桥梁处,如图1-1所示。

传感器子系统是实现桥梁结构监测的前提及关键所在。传感器子系统的功能是测量、获取桥梁健康评估所需的各种重要参数。监测的内容主要包括:外部环境及荷载,如温度、湿度、风速、车辆荷载等;桥梁结构几何变形,如位移、基础沉降、倾斜等;桥梁特性变量,如危险截面应力、预应力损失、自振频率等。

监测使用的方法,主要有机械式测量方法、电测法、光测法及光机电结合测量法等。监测用传感器或测试仪器主要有温度计、湿度计、测速仪、称重仪、百分表、位移计、GPS、倾角仪、水准仪、经纬仪、电阻片、振弦式传感器、光纤传感器、加速度传感器等。

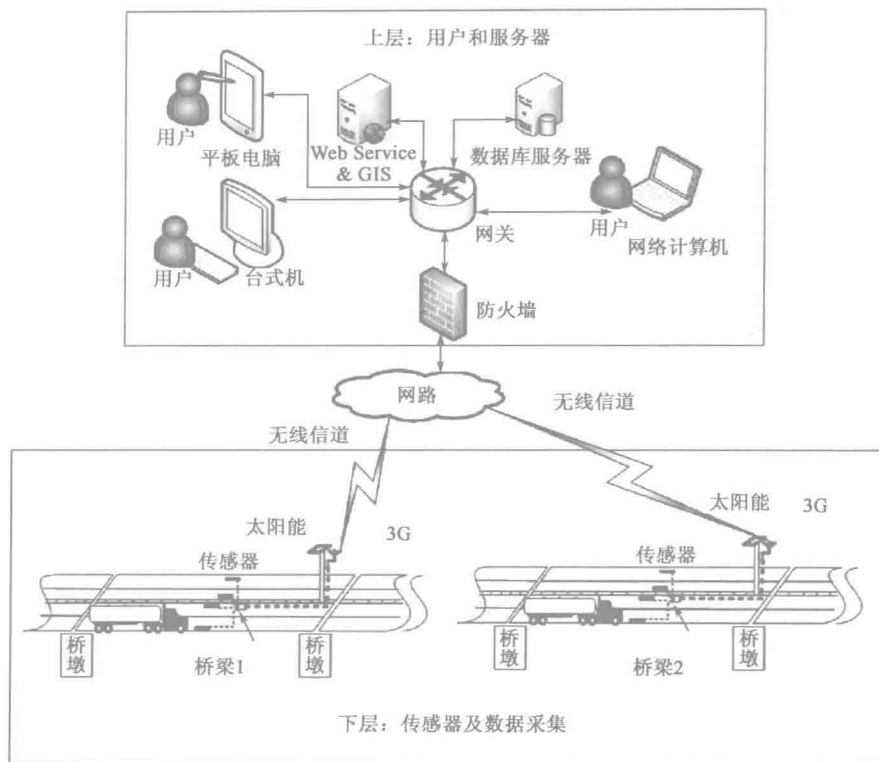


图 1-1 结构健康监测体系框架

数据采集与传输子系统是实现桥梁结构监测的重要中间环节,其主要功能是完成监测数据的采集、预处理及通信。数据采集是对由传感器获得的各种信息源进行物理信号量化、收集及管理,必要的情况下进行短暂的存储。数据预处理是对采集的数据、信号进行最初的过滤,剔除一部分噪声影响。数据通信即数据传输,它能将监测数据发送到控制中心,并将系统的控制指令传输到传感器采集及预处理设备。数据的采集方式可以采用定期人工采集、机器半自动采集、全自动采集。数据传输方式主要有有线传输和无线传输,或者采用有线和无线传输的组合方式。

数据处理与分析子系统是对采集及传输到基站的现场监测数据进行处理和分析。该子系统中的数据处理,一般可分为数据预处理和数据二次预处理两个步骤。数据预处理主要对采集的数据信号进行滤波、统计等运算,计算的结果作为监测系统的初级输入,这部分工作通常会结合在数据采集与传输子系统中进行。数据二次预处理在基站电脑或服务器上,主要是利用信号处理技术对数据进行降噪处理、时频域参数识别以及结构特征参数获取等。此外,数据处理与分析子系统还应实现数据动态管理及查询的功能,保证现场监测的原始数据以及经过处理后的数据能够随时被查询及调用。

结构状态评估子系统是整个结构健康监测系统建立的目的所在。它将现场监测数据、瞬时或长期获取的桥梁结构性能信息进行综合处理,实现数据的分析与解释、桥梁健康状况评估以及管理维修决策。结构状态评估子系统,一般包括桥梁关键构件损伤情况、桥梁整体安全性与可靠性、关键构件和桥梁整体剩余寿命评估及预测等功能。该系统由模型修正、损伤识别、结构安全评估及管理决策等功能模块构成。模型修正模块利用现场监测数据与理论计算或有限元模型计算数据进行对比,通过适当技术来修正按设计参数建立的有限元模型。损伤识别模块通过一定的损伤识别方法和技术,对经过数据处理与分析子系统的现场数据进行分析,并与修正后的有限元模型计算数据进行对比,从而识别结构损伤状况。结构安全评估模块,一般利用结构分析设计专用软件将损伤识别的结果和实际工程结构的专家经验数据库相结合,对桥梁的健康状况进行评估,如分析桥梁结构的使用状态、对突发状况进行预警、预测结构的剩余寿命、评估结构的安全可靠性、对已有结构损伤提出合理的修理维护策略等。桥梁性能与桥梁自身结构特点、使用状态、环境影响等诸多因素相关,这决定了结构状态评估子系统是一个复杂的系统工程,需要大量数据的支撑,并结合一定的经验综合判断。

1.2 桥梁健康监测系统研究现状

1.2.1 国外桥梁健康监测系统的研究与应用

自 20 世纪 80 年代以来,国外发达国家一直着力于一系列桥梁管理作业的系统化、规范化建设,作为桥梁管理的基础——桥梁结构健康监测体系,它的研究已达到较高的水平,在实际桥梁管养作业中也得到了广泛的应用,为这些国家的交通安全提供了强有力的保证。

目前,国外大约有超过 20 座的大型桥梁(大跨 100m 以上)安装了结构健康监测系统,较具代表性的桥梁有:丹麦的 Great Belt 大桥、加拿大的联邦大桥、美国的 Commodore Barry 大桥、日本的明石海峡大桥、韩国的首尔大桥等。这些监测系统建立的根本目的是:①验证设计阶段的一些关键假设和方法来完善现有的设计规范和标准,为今后建设类似的大型桥梁积累经验;②探知外荷载和结构响应中的缺陷,尽量在较早的阶段发现或预测可能发生的破坏或退化,确保结构自身和运营安全;③在不同类型极端事件发生后能够为结构安全评估提供实时有效的结构响应信息;④为结构的日常养护、维修、加固等措施提供技术支撑;⑤监测维修加固措施的实际作用;⑥获取实桥现场一手的技术资料,为桥梁工程师和科研人员开展前沿研究提供宝贵的技术信息。

从国外的研究现状来看,大型桥梁结构健康监测系统的应用与研究,主要集中在美国、欧洲国家和日本。

1) 美国

美国桥梁管理的发展起源于 1967 年俄亥俄州银河桥(Silver Bridge)断桥事件。此事件引起美国各界对老旧桥梁问题的重视,美国国会因此于 1968 年通过《联邦公路法案》,并由美国联邦公路局(FHWA)首先建立《全国桥梁清册》(National Bridge Inventory,简称 NBI),进行全国桥梁相关资料的收集与整理,于 1971 年订立《全国桥梁检测标准》(National Bridge Inspection Standards,简称 NBIS),1972 年颁布《国家桥梁结构调查和评估指南》(Recording and Coding Guide for Structure Inventory and Appraisal of the National's Bridges),要求各州政府须每两年将其所辖的桥梁进行一次检测作业,检测所得资料须能符合《全国桥梁检测标准》中“桥梁结构调查评估表(Structure Inventory and Appraisal Sheet)”的要求,并录制为计算机档案,汇总交由美国联邦公路总署进行资料更新与保存。1970 年,美国国家公路交通协会(AASHTO)出版了《桥梁养护检测手册》(Manual for Maintenance Inspection of Bridges)。这两家机构及各州交通部又不断完善和出台相关文件,形成了今天一系列完善的桥梁健康管理体系,并在此基础上开发出了很多适用的桥梁管理系统,其中最为著名的是由美国联邦公路局主持开发的桥梁管理系统 PONTIS。

在对结构监测系统数据的处理与分析的形式方面,美国没有专门的部门来处理健康监测传感器的数据,传感器的数据一般是以科研为目的由大学或者研究机构以项目的形式开展相关研究工作。项目的承担单位(含多单位合作的情况)负责处理监测系统的数据分析,相互之间目前还未形成数据的联网,主要是通过学术会议的形式进行技术交流。

近年来,美国对结构监测系统数据的处理与分析,也开展了不少探索性的理论研究工作^[8-20]。主要分为两个方面:基于确定性分析和基于概率分析。基于确定性分析方面,Seo等^[8]重点介绍了如何通过结构监测系统数据所获得的荷载和结构响应信息修正理论有限元模型,从而能够更准确、有效地评估桥梁的承载能力。选取的实例桥型为钢混组合体系桥梁,有限元模型中考虑修正的参数包括关键构件的惯性矩、材料弹性模量、支撑处的转动约束等,结构有限元模型修正过程采用多次迭代和利用最小二乘回归分析将实测与理论分析的响应之间的差值减小到合理范围。基于概率分析方面,Kwon和Frangopol^[9-20]利用监测数据(即钢箱梁应变)进行钢桥屈服强度和疲劳强度的可靠度分析。其中针对的研究对象是单个构件的可靠度,而不是整体结构,单个构件可靠度的极限状态方程是给定的,其中的结构响应是通过实测应变数据得到的。

2) 欧洲国家

欧洲国家中的丹麦,其桥梁危害以冰冻与盐害造成桥梁腐蚀的情况最为严重,因此非常重视桥梁的维护与管理,着手研究桥梁结构的健康管理体系。桥梁结构的健康监测程序是参照丹麦运输部公路桥梁部门提出的研究报告,而对桥梁的评估,则依照1994年颁行的《既有桥梁分级指南》(*Guide for Classification of Existing Bridges*)实施。丹麦研究桥梁结构健康监测体系已超过20年,计算机化桥梁管理系统程序也已迈入第三代。芬兰是北欧岛国,桥梁也有严重盐害问题,其对桥梁的维护管理相当重视,桥梁管理系统发展已有相当成效。英国目前正在进行一个15年的工作计划,目的是提升所有桥梁承载能力以符合欧洲轴轮重量标准,并且正在开发符合其需求的桥梁管理系统。

欧洲国家的科研人员,近年来对结构监测系统数据的处理与分析,也进行了许多基础性研究工作^[21-24],研究方法基本与美国类似。葡萄牙学者Costa和Figueiras^[21]研究了如何利用应变传感器系统对服役期较长的铁路钢桥进行性能评估,其同时考虑了电传感器和光纤传感器两种类型传感器。并指出目前在很多研究中,由于没有车辆动态称重系统(WIM),车辆信息是利用应变传感器的数据通过分析来获取的。德国学者Hosser等^[22]研究并给出了利用结构监测数据对结构进行基于可靠度的结构体系评估方法,其中介绍的许多方法,如一次和二次二阶矩法、事件树法等均属于理论分析范畴,在实际工程应用中还比较难推广。

3) 日本

日本桥梁数目已超过65万座,近10年来又有诸如濑户大桥、六甲岛桥、明

石海峡大桥等许多大型桥梁陆续兴建完成。日本是一个地震频发的国家,因此关于地震、台风等自然灾害的桥梁安全预警,是日本桥梁管理机构所面临的重大问题。日本建设省土木研究所于1988年发布《桥梁检测手册》,统一全国桥梁的检查标准、检查周期,并制定了检查结果的标准处理事项等规定;于1990年研发出一套桥梁检测资料系统MICH1,将全国所有桥梁的检查结果储存于该系统的数据库中,再根据桥梁各种损伤形态、各构件健全度而评定其损害等级。在此基础上,日本建立了为各级管理机构使用的桥梁健康管理体系。

日本在对大型桥梁的管养工作方面,主要是依赖人工巡检获知桥梁相关信息,结构健康监测系统一般作为辅助工具。因此,其大型桥梁上安装的传感器数量一般较少,针对监测系统数据的专项分析研究的投入也比较少,这里不再详述。

1.2.2 国内桥梁健康监测系统的研究与应用

1) 香港

20世纪90年代末,随着一批大型桥梁的建成,香港逐步开始将结构健康监测系统安装到桥梁结构上,较具代表性的就是香港青马大桥。从开始应用到现在近20年时间内,香港对于监测系统所获数据的应用也积累了不少有益经验。

在对结构健康监测系统数据的处理与分析的形式方面,香港是以路政署为主要承担单位来负责各个大桥监测系统数据的日常存储工作;而在数据分析方面,则主要是借助香港相关高校的科研团队,其中较有名的是香港理工大学的徐幼麟教授及其团队等。

在对结构健康监测系统数据的处理与分析的具体研究内容方面,香港的科研工作者结合当地大桥监测系统的实际情况开展了全方位的研究工作。以青马大桥为例,相关研究人员利用其监测系统所获海量数据开展了全方位的大跨度桥梁结构健康监测和安全评估的研究。在评估系统模块,研究人员综合利用三维空间杆系有限元模型、全三维混合有限元模型、部分三维多尺度有限元模型以及部分三维立体有限元模型,全方位多角度开展相应的分析工作。具体包括整体模态分析、截面和监测点影响系数分析、整体恒载和活载承载能力分析、静动态响应和稳定性分析、构件应力等值线分析、构件交节点应力分析等。在利用评估分析结果进行结构预警方面,采用三种运营策略,分别为:①运营状态1,即 $\sigma_m \leq 75\% \sigma_{SLS}$ 时,该种状况下进行例行的数据分析,报告监测结果,但不需要进行结构安全评估;②运营状态2,即 $75\% \sigma_{SLS} \leq \sigma_m \leq 100\% \sigma_{SLS}$ 时,该种状况下进

行重点监测,若达到或超越 σ_{SLS} 指标时,则进行结构安全评估,需报告监测和临界构件识别结果;③运营状态3,即 $\sigma_m \geq 100\% \sigma_{SLS}$ 时,确定达到或超越 σ_{SLS} 指标的构件或截面,并进行结构安全评估,需报告达标、超标构件或截面的安全评估结果。

针对该项目的研究方向,值得借鉴的研究成果主要包括有限元模型建立方法、有限元模型分析方法以及疲劳状态评估方法等。

(1)在有限元模型建立方面,不少文献都较详细地介绍了青马大桥结构有限元模型建立的具体方法^[25],建模过程中的关键点归纳如下:

①有限元模型主要分为:钢主梁、桥墩和桥塔、缆索系统和衔接构件以及整体结构四大部分。

②根据不同类型构件的受力行为和特点选取合适的单元类型,如梁单元、板单元、壳单元、索单元以及实体单元等。

③钢箱梁复杂节点如何模拟,支撑约束处如何考虑等。

④在后续的分析工作中,针对不同的力学问题分别采用有针对性的有限元模型,具体包括三维空间杆系有限元模型、全三维混和有限元模型、部分三维多尺度有限元模型以及部分三维实体有限元模型,全方位多角度开展分析评估工作。

(2)在有限元模型分析方法方面,详细介绍了精细化计算方法和工程计算方法两种模型分析方法。精细化计算方法是采用模态叠加法考虑风-车-桥耦合作用进行精确有限元分析,但是从文献中介绍的内容可以看出此方法计算效率较差,140s的应力历程分析需要数小时。为了解决精细化方法运行效率较差的问题,同时需能满足工程精度要求,文献介绍了工程计算方法,即利用影响线加载单独考虑每种荷载的作用,再进行线性叠加。最后,文献中利用实例结果证明了工程计算方法结果既能满足工程精度要求又能大幅提高计算效率。

(3)在疲劳状态评估方面,不少学者以青马大桥为研究对象,针对结构状态评估中的各种难点问题开展了深入研究^[26-30]。主要研究成果列举如下:

①明确了疲劳分析的具体步骤,即:a.整体结构有限元分析求出易产生疲劳构件的应力分布情况;b.局部应力分析以确定热点处的应力集中系数,即易产生疲劳处的局部应力与整体应力的比例关系;c.确定关键位置处的应力范围和平均应力;d.进行裂缝初始阶段的疲劳损伤分析或裂缝发展期的裂缝发展分析,以确定疲劳损伤的状态和结构剩余使用寿命。

②比较研究了3种计算有效应力范围的方法:平方根法(RMS)、Miner-准则法和连续损伤力学法(CDM)。其中CDM方法不仅考虑了在疲劳累积过程中循