



结构损伤多尺度 模拟与分析

李兆霞 · 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

江苏高校优势学科建设工程资助项目

结构损伤多尺度模拟与分析

李兆霞 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

内 容 简 介

本书介绍了作者带领的研究团队十多年来在大型土木结构损伤多尺度模拟与分析领域的主要研究成果及其在结构抗震分析、桥梁疲劳损伤预后分析中的应用。本书主要包括:微细、宏观尺度上材料与结构的损伤特征观测与分析,不同尺度上材料与结构损伤的合理表征及其量化方法,结构损伤多尺度分析的基本方程与计算方法,结构损伤多尺度分析的实施流程及其验证,损伤跨尺度演化致混凝土构件局部失效的模拟与分析,混凝土结构损伤演化致失效过程的多尺度跨层次自适应模拟与分析,以及大跨桥梁钢箱梁结构疲劳损伤演化过程的多尺度跨层次模拟。本书同时介绍了这些理论与方法在钢筋混凝土框架结构损伤失效分析与重大桥梁工程结构疲劳损伤演化过程模拟中的应用。

本书可作为力学、土木、防灾、交通相关专业研究生的参考读物,也可供相关领域的科研人员和相关工程结构与维护的技术人员在其研究和工作中参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构损伤多尺度模拟与分析/李兆霞著. —南京:

东南大学出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-5641-7513-9

I. ①结… II. ①李… III. ①土木工程—
工程结构—损伤(力学)—研究 IV. ①TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 294363 号

结构损伤多尺度模拟与分析

著 者 李兆霞

出版发行 东南大学出版社

社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人 江建中

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d.d.00@163.com

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 press@seupress.com

经 销 全国各地新华书店

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

版 次 2017 年 12 月第 1 版

印 次 2017 年 12 月第 1 次印刷

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 16 彩色 1

字 数 414 千

书 号 ISBN 978-7-5641-7513-9

定 价 78.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

前言

多尺度模拟和计算是 21 世纪迅速发展起来的热点与前沿研究方向,特别是在材料科学、化学、流体力学和生物学领域,因为这些领域中的问题本质上是多个尺度相关及耦合的,即同一问题在不同尺度下的演变过程是由不同的物理定律支配,但在不同尺度上的响应特性又是相互关联的。因此,目前国际上方兴未艾的多尺度模拟与分析研究大都是针对材料特性分析的需要,并应用于各类非均质材料包括混凝土的多尺度损伤与失效过程模拟,涉及的尺度量级为纳米尺度到微观或者宏观尺度。与材料多尺度损伤及破坏现象类似,结构损伤及性能劣化也是从局部的微细观缺陷开始的多尺度演化过程。但是却只有较少的研究工作关注结构损伤分析中的多尺度问题。

结构损伤演化过程不仅是多尺度耦合的,同时还是跨层次的,而且大型土木工程结构的多尺度演化机理与结构构造存在相关性。现代重大工程结构的两类基本构造钢结构与钢筋混凝土结构在多尺度建模理论上是既有相关性又有所区别的:前者须重点关注源于结构高内力区的焊连接部位细观缺陷的损伤演化,后者应关注关键承重、传力构件的易损局部中混凝土内部的细观裂纹及其与钢筋之间结合面上的界面缺陷。但从离散化角度看,它们的共性特征都是:结构性能由结构的整体刚度矩阵的性质来决定,不同构造类型的结构损伤演化在开始时都是局部性的,对应的都只是结构整体刚度矩阵中一个很小部分的变化,但这个“很小”的变化最终却可能导致庞大结构的失效。起源于材料层次上的微细观尺度的缺陷如何在结构最不利局部发生演化,蔓延到结构中的构件层次损伤乃至导致结构整体失效?这是一个亟待探讨的关键科学问题。大型土木结构的破坏常常是突发的灾难性行为,因此比材料的失效更为可怕。损伤多尺度演化在不同层次上的临界敏感性表现为,如果结构服役期内长期累积的损伤已达一定程度,脆弱的非稳定状态随时可能被台风、地震等极端灾害引发的过载造成损伤演化的“跃进”而打破,使得损伤演化从材料或构件层次突然上升高一阶层次造成灾难。为有效干预和阻止这类损伤演化致结构失效的过程以保障结构全寿命安全,唯一的途径是必须能够模拟和分析这类复杂的演化过程,这也正是作者所带领的研究团队多年来为之不懈奋斗的目标。

作者带领的研究团队几十年来专注于大型土木结构损伤多尺度模拟与分析方法的研究,在长期的研究工作中不断深入和逐步建立起上述认知,研究内容也经历了一个从单纯的基于结构监测信息进行桥梁结构疲劳状态评估,到综合疲劳损伤多尺度模拟与分析及监测信息进行结构疲劳损伤预后,再到各类大型土木结构损伤多尺度跨层次演化过程分析的逐

步深化过程。现在看来,我们的研究工作进程大致可分为如下三个阶段:

第一阶段:1998—2001年。这也是桥梁结构健康监测系统研究刚刚兴起的初期阶段。作者从香港青马大桥基于监测信息的桥梁结构疲劳损伤分析着手,研究桥梁结构疲劳损伤早期识别方法,完成了国家自然科学基金项目“基于健康监测的大型钢桥梁疲劳损伤早期识别方法及应用(50178019)”、香港特区政府资研局(RGC)资助项目“Fatigue Evaluation of Existing Bridges Based on Continuum Damage Mechanics and Online Monitoring”(PolyU5042/01E)。我们在此阶段的研究发现,大型复杂结构的局部疲劳损伤,是无法从单纯的结构健康监测信息反演或识别得到的。识别局部的疲劳损伤必须通过监测信息的反演与结构损伤演化过程模拟的正演相结合才有成功的可能。而结构疲劳损伤演化是一个多尺度耦合的演化过程,从局部材料中的微细观损伤演化发展到庞大的桥梁结构的宏观力学性能劣化。由此我们开始了研究工作的第二阶段。

第二阶段:2002—2007年。此阶段我们开始转向大跨桥梁结构损伤多尺度模拟与分析的研究,完成了国家自然科学基金项目“大跨结构多尺度损伤模拟与失效行为仿真分析(50278017)”、香港特区政府资研局(RGC)资助项目“Nonlinear Physical-based Modeling of Long-span Steel Bridges for Health Assessment in Structural Health Monitoring”(PolyU5034/03E)等;并且开始“结构劣化的时空多尺度模拟和多因素同步分析方法及其应用(10672038)”项目研究。上述两个阶段长达10年的工作成果,已经系统地总结于作者在2012年出版的《在役桥梁结构疲劳监测与评估》一书中。

在上述的第二阶段末期,我们在《力学进展》发表了题为《大型土木结构多尺度模拟与损伤分析——从材料多尺度力学到结构多尺度力学》的综述论文,比较材料多尺度问题与结构多尺度问题的共性与个性特征,借鉴材料多尺度力学的研究方法思路,提出了面向结构损伤演化过程分析的结构多尺度力学研究思路。现在看来,这篇论文标志了我们在结构损伤多尺度模拟与分析研究的一个关键节点,由此我们的研究工作进一步深入,进入了第三阶段。

第三阶段:2008年至今。在此阶段我们提出了结构损伤多尺度模拟与分析的研究技术路线,并围绕该技术路线全面展开了各类大型土木结构损伤多尺度模拟与分析研究。此阶段的工作得到国家基金项目“结构劣化的时空多尺度模拟和多因素同步分析方法及其应用(10672038)”、重大研究计划项目“重大工程结构损伤破坏非线性效应的多尺度模拟与分析(90715014)”和“面向结构损伤预后的结构多尺度力学研究及其应用(11072060)”项目的资助。从2008年至今将近10年过去了,在这近10年中我们研究团队的博士生与硕士生们完成了一系列相关学位论文,都是围绕结构损伤演化过程多尺度模拟与分析,这些研究成果将系统地总结于本书中。作者深知,虽集一个团队十多年来的努力形成了本书之成果,但一个团队的力量毕竟有限;故出版此书的目的,不仅仅是为了系统地总结和汇聚本团队在结构损伤多尺度模拟与分析方面的研究成果,更有抛砖引玉之意,希望以此唤起更多同行加入这一研究领域,共同面对结构安全服役这一重大工程需求带来的一系列科学问题的挑战。

作者在此感谢国家自然科学基金委员会的长期资助,还要感谢长期的科研合作者与研究团队中的老师和研究生们,尤其是徐幼麟教授、郭力教授、王莹副教授、吴佰建讲师、何顶顶和孙宾讲师,以及陈志文、赵超凡、江峰锋、王康、盛惠琴、汪璇等毕业研究生。正是大家长期的、配合默契的合作研究,以及研究生们在学位论文研究过程中完成的相关计算和分析结果,所有这些大家完成的点滴工作汇聚起来才能够有在此书中展现给读者的研究成果之整体。由于我们对自然现象的认识永远是阶段性的、有局限的,同时作者的水平也有限,书中难免有疏漏与表述不当之处,热切盼望同行和读者予以指正。

李兆霞

2017年夏于南京

目 录

第一章 绪论	1
第二章 微细、宏观尺度上材料与结构的损伤特征观测与分析	8
2.1 金属结构焊接区的微细观缺陷及其演化特性	8
2.1.1 焊接结构内部缺陷探测	9
2.1.2 两类主要初始缺陷	11
2.1.3 细观裂纹演化特性	12
2.1.4 细观孔洞演化特性	16
2.2 焊接区域损伤演化的分形特征	20
2.2.1 分形的概念	20
2.2.2 焊接损伤区域裂纹扩展的分形特征	21
2.2.3 细观孔洞演化过程中的分形维数	23
2.3 多尺度同步观测与分析获得的钢结构疲劳损伤跨尺度演化特征	25
2.3.1 观测方法	26
2.3.2 疲劳裂纹萌生机制分析	28
2.3.3 疲劳裂纹扩展规律	31
2.3.4 疲劳裂纹萌生过程中的损伤多尺度特征分析	33
2.3.5 宏细观损伤与结构响应的关联性分析	34
2.3.6 易损部位损伤导致的结构响应非线性效应	36
2.4 混凝土类脆性材料细宏观损伤特征及其演化特性	38
2.4.1 混凝土在材料层次上的微细宏观损伤特征及演化特性	39
2.4.2 构件和结构层次上的混凝土损伤特征及演化特性	41
第三章 不同尺度上材料与结构损伤的合理表征及其量化方法	44
3.1 焊接损伤区的分形损伤跨尺度表征	44
3.1.1 含细观裂纹的焊接区域中分形损伤跨尺度表征	44
3.1.2 含细观孔洞的焊接区域中分形损伤跨尺度表征	47
3.2 金属疲劳损伤多尺度表征及其跨尺度演化规律	50
3.2.1 微裂纹成核与扩展行为	50
3.2.2 疲劳损伤变量的定义	52
3.2.3 描述疲劳微裂纹成核与扩展行为的多尺度损伤演化方程	52

3.2.4	模型参数反演与模型验证	54
3.3	脆性材料中分布式微裂纹的损伤表征方法	56
3.3.1	含大量分布裂纹的无限大脆性固体的细观力学模型	57
3.3.2	微裂纹对混凝土材料宏观性能的影响	58
3.4	由微裂纹跨尺度扩展主导的混凝土损伤演化过程数值模型	64
3.4.1	模拟准则与建模流程	64
3.4.2	裂纹扩展准则	68
3.4.3	裂纹扩展过程中的各种扩展形态的模拟	70
3.4.4	数值模拟案例	72
3.5	构件与结构中的耗能型损伤的表征与量化方法	74
3.5.1	构件与结构耗能型损伤表征的思路及原理	75
3.5.2	构件与结构耗能型损伤量化方法	77
3.5.3	常用的工程结构损伤指标	80
3.5.4	典型钢筋混凝土框架结构的损伤量化分析	82
3.6	钢架结构局部与整体损伤的表征与量化方法	91
3.6.1	易损局部的特征及其定义	91
3.6.2	结构损伤演化过程分析中的各层次代表性体元及其尺度特征	92
3.6.3	构件层次上的损伤表征与量化方法	94
3.6.4	结构层次上的损伤表征与量化方法	95
3.6.5	各类典型钢架结构的损伤量化方法	96
3.6.6	节点处的损伤对结构损伤的影响	101
3.6.7	框架结构中构件层次损伤与结构层次损伤之间的关联性	102
3.6.8	结构损伤模拟与量化分析案例:门式钢框架结构	103
第四章	结构损伤多尺度分析的基本方程与计算方法	106
4.1	结构损伤多尺度分析的基本方程	106
4.1.1	串行嵌套多尺度方法的基本方程	107
4.1.2	一致多尺度方法的基本方程	110
4.2	串行嵌套式多尺度计算方法	112
4.2.1	物理平均化方法	112
4.2.2	数学渐进均匀化方法	114
4.2.3	两种方法的联系与区别	121
4.3	一致多尺度计算方法及跨尺度界面单元衔接	121
4.3.1	跨尺度界面位移协调方法	123
4.3.2	跨尺度界面应力连续方法	124
4.3.3	约束方程由局部坐标系到整体坐标系的转换	127
4.4	考虑局部损伤演化的结构抗震性能多尺度分析方法	130
4.4.1	地震荷载下钢材损伤演化率与损伤本构关系	130
4.4.2	钢结构地震损伤多尺度分析方法及其实施流程	131

4.4.3	细观损伤演化对连接构件抗震性能的影响	133
4.4.4	由损伤演化导致的钢桁架结构失效进程的分析	140
第五章	结构损伤多尺度分析的实施流程及其验证	144
5.1	基于 ABAQUS 软件二次开发的结构损伤分析算法	144
5.1.1	UMAT 及其调用方法	145
5.1.2	UMAT 子程序的实施流程	146
5.1.3	弹塑性状态和损伤状态的确定	147
5.1.4	耦合材料损伤的应力更新算法	149
5.1.5	一致切线模量的定义和求解	151
5.1.6	实施过程中的主要问题和注意事项	152
5.1.7	ABAQUS 内核语言 Python 及基本功能	153
5.2	嵌套多尺度方法的算法流程及其有效性验证	153
5.2.1	基于均匀化方法的嵌套多尺度分析的算法流程	154
5.2.2	嵌套多尺度方法的算法与程序验证	155
5.3	一致多尺度方法的算法流程及其验证	157
5.3.1	结构损伤一致多尺度计算的流程	157
5.3.2	一致多尺度方法的有效性验证	158
第六章	损伤跨尺度演化致混凝土构件局部失效的模拟与分析	163
6.1	混凝土梁损伤演化致失效的多尺度分析方法	163
6.1.1	混凝土梁损伤跨尺度演化分析模型	163
6.1.2	四点弯曲梁损伤算例分析	165
6.2	损伤跨尺度演化导致的混凝土梁强度的尺寸效应	167
6.2.1	三点弯曲梁损伤多尺度模型	167
6.2.2	计算结果与分析	169
6.2.3	混凝土梁尺寸效应的发生机理分析	171
6.3	钢筋混凝土粘结界面损伤多尺度模拟	173
6.3.1	钢筋混凝土拉拔构件细观损伤分析模型	174
6.3.2	钢筋混凝土粘结界面损伤多尺度模拟	176
6.3.3	钢筋混凝土粘结界面损伤多尺度分析	177
6.4	钢筋混凝土构件损伤演化致失效过程的自适应模拟与计算方法	182
6.4.1	基于材料细观构造图像的混凝土细观模型建立方法	182
6.4.2	混凝土材料细观损伤演化过程模拟的基本方程	185
6.4.3	混凝土构件损伤跨尺度演化过程的自适应模拟与分析的策略	190
6.4.4	混凝土损伤演化跨尺度自适应分析的有限元基本方程	193
6.5	混凝土构件损伤演化致失效的自适应模拟与分析案例	197
6.5.1	钢筋混凝土拉拔损伤演化过程的细观数值模拟	197
6.5.2	混凝土柱在模拟地震荷载下的损伤演化致失效分析	199

第七章 混凝土损伤演化致结构失效过程的多尺度跨层次自适应模拟与分析·····	203
7.1 混凝土结构损伤演化过程的多尺度跨层次自适应模拟策略·····	204
7.2 损伤演化多尺度跨层次分析的区域自适应有限元理论·····	208
7.2.1 损伤多尺度跨层次演化过程自适应分析的区域变分原理·····	208
7.2.2 损伤多尺度跨层次演化过程自适应分析的有限元方程组·····	210
7.3 混凝土框架结构损伤演化致失效的多尺度跨层次自适应分析·····	213
第八章 大跨桥梁钢箱梁结构疲劳损伤演化过程的多尺度跨层次模拟·····	219
8.1 高、低周疲劳交互作用下的疲劳损伤多尺度模拟与分析方法·····	219
8.1.1 高、低周疲劳交互作用下的疲劳损伤演化方程·····	220
8.1.2 多尺度疲劳损伤模型的参数反演与模型验证·····	225
8.2 考虑钢材内部微观缺陷的高低周疲劳损伤多尺度模拟与分析方法·····	227
8.2.1 考虑钢材微观构造的疲劳损伤多尺度模拟与分析方法·····	227
8.2.2 基于钢材微观构造图像的高低周疲劳损伤多尺度模拟与分析方法·····	229
8.2.3 疲劳短、长裂纹共同扩展导致的疲劳损伤演化过程分析案例·····	230
8.3 大跨桥梁钢箱梁结构疲劳损伤累积过程分析方法·····	232
8.4 昂船洲大桥钢箱梁结构疲劳损伤多尺度跨层次演化过程模拟·····	235
参考文献·····	243
作者简介·····	245
彩图附录·····	247

第一章

绪 论

大型土木工程结构如超高层建筑、超大跨空间场馆、超柔度高耸结构和特大跨桥梁等,其共性特征是超大、超高或超长,构形复杂,体量巨大,超出现行设计规范,且每个结构都独一无二、不可复制。近年来我国基本建设投资以占国民生产总值约 15%~20% 的比例稳步上升,大批重大工程结构已完成或正在建设中。我国有大量的 100 m 以上的超高层建筑,以及造型独特、具有世界影响的鸟巢、国家大剧院等建筑;世界上前十大主跨跨径最长的斜拉桥、悬索桥、拱桥和跨海大桥,半数以上在中国。值得注意的是,这些大型土木工程结构全都是在现场施工完成建造过程,而所有现场施工完成的土木结构在其服役初期,材料内部和构件连接部位就不可避免地存在先天细观缺陷,如钢结构中焊连接区域的细观缺陷、钢筋混凝土结构中混凝土中的细观裂纹及其与钢筋之间结合面上的界面缺陷,在结构漫长服役期内环境侵蚀、材料老化和荷载的长期疲劳效应,不可避免地会导致结构中的损伤积累和抗力衰减,在漫长服役期内经常发生的突发极端灾害的交互作用又可能会使缓慢的损伤演化发生突变,造成构件或结构层次上失效而导致灾变。因此,在所有土木工程结构安全服役中的损伤的共性特征是:它们都是跨越微/细、宏观尺度和从材料、构件再到千米级结构层次的损伤多尺度、跨层次非线性演化致结构失效的过程。

随着全球气候异常导致的地质灾害、地震、台风等灾害越来越频繁发生,加上管理不力引起的人为事故和恐怖事件对结构的冲击,这些工程结构正面临着越来越多的可能诱发结构损伤加速演化的突发事变与不利环境。这类随时可能发生的突发强载荷除了会加快结构中损伤演化的进程,还可能造成损伤从材料层次向构件或结构层次的跃进,令结构发生毫无预警的灾难性破坏。大型土木工程结构一般都是涉及国家公共安全的重大建筑工程,具有重要功能并通常是当地的地标性建筑,一旦发生破坏,不仅造成重大人员伤亡和巨大经济损失,还会产生极坏的社会影响。因此,随着我国超大、超高或者超长、超限的结构越来越多和服役环境的越来越恶劣,工程结构的安全服役问题就越来越突出,但是我们现在对结构在服役期内损伤演化机理、性能劣化状态和潜在灾变过程尚无法探知,对其在损伤累积到一定程度后遭遇极端灾害时是否会导致损伤跨层次突变也无法预知,这就造成我们对结构全寿命周期中的潜在损伤灾变过程及其后果无法掌控。因此,解决结构安全服役中的共性科学问题,建立能够主动把握损伤演化过程的结构损伤预后系统,改变长期以来土木工程结构全寿命周期中的潜在损伤演化灾变过程及其后果无法掌控的现状,在灾害越来越常态化的今天已成为一个刻不容缓的重大需求。

虽然许多重要结构中现在已安装了结构健康监测(Structural Health Monitoring, SHM)系统,但由于目前 SHM 系统的监测只限于结构层次,而相关的损伤检测研究的学术理念又是被动的:只有当损伤演化到结构层次造成结构整体动力特性的显著变化才可能被

发现。这就给利用 SHM 信息认识结构层次以下的局部性能劣化带来困难。土木工程结构中局部损伤累积与极端灾害下的损伤突变具有交互耦合作用,即使地震、台风荷载的作用未造成结构立即破坏,但会诱发结构局部损伤演化的进程“提速”,可能造成损伤从小尺度向大尺度、低层次向高层次的“跃进”,其损伤演化进程随时可能由于外在的微小诱发而导致崩溃性灾变从而导致结构失效(如同一根稻草也会压垮一个骆驼)。如果不能把握结构中局部损伤演化的进程,势必更不可能捕捉预测到极端灾害下的损伤突变特征。由此可见,仅凭监测系统关注结构损伤“结果”而非演化“过程”,是无法掌握损伤过程中造成的结构安全性能劣化状态,这就无法给结构时变安全性能分析提供必要的认知。具有前瞻性的学术理念应该是主动地把握结构中损伤演化的过程,以便可以在损伤演化从关键局部的材料层次发展到可能导致结构性病害乃至灾变发生以前就能够预见到。

然而,要主动把握大型土木工程结构中损伤演化的过程是相当困难的。相对于其他工程领域,土木领域结构的服役特点为:①室外环境复杂、恶劣,作用载荷复杂和部分不确定。②服役时间漫长,其间结构劣化与材料损伤共生共存、相互影响。③损伤始自建造中产生的缺陷及其局部应力集中;在施加于整个结构上的工作荷载作用下,局部损伤演化造成结构劣化。因此,结构劣化的因与果实际上是位于结构全尺度与局部细观尺度这样两个不同量级的空间尺度上。④多因素耦合、多物理现象纠集、交叉作用,无法相互剥离。上述特点决定了大型土木结构损伤过程分析的困难在于:①由于结构构形复杂、体量巨大,无法进行结构全尺度在线试验,从试验方面认识劣化过程;②由于劣化过程是跨尺度的演化过程,给以损伤过程分析为目标的结构模拟及其分析方法带来极大的挑战;③劣化过程漫长而持久,其间又可能有突发过载造成的损伤与长期累积的疲劳损伤交互作用,损伤分析所需涉及的时间尺度也是多量级的,突发过载损伤通常发生在极短的时间内,而疲劳损伤的累积则是发生于结构漫长的服役期,还有蠕变损伤等,都在各自的时间尺度上萌生和演化,无法在同一时间尺度下分析;④在缺乏在线试验信息的情况下,难以把握上述复杂过程模拟的方向与精度。在重要的大型土木结构安装了 SHM 系统的新形势下,上述的困难①和④都有望加以改善或克服。因此,问题将主要集中于②和③带来的阻碍。结构服役期内,时间微尺度内发生的事件(损伤)通常也是只能在空间微尺度内观测到的现象(地震造成的损伤除外),因此,时间尺度问题与空间尺度问题经常表现出较强的关联性。另一方面,结构健康监测系统输出的结构响应信息事实上是结构在所有作用因素下的响应和多物理现象的总和,其中包括运营载荷作用下的力学现象(变形、疲劳等)、环境作用下的化学现象(腐蚀、锈蚀等),还有电磁场、温度场等的作用。如果只考虑单一作用因素进行分析,势必无法与 SHM 系统输出多物理现象综合响应相比较。

由此可见,土木结构的安全除了受制于由结构服役特点引起的灾害环境恶劣、载荷作用复杂等因素外,更为关键的是,在结构漫长服役期间结构劣化与材料损伤共生共存,损伤演化过程从材料中的微/细观缺陷和构件连接部位在建造中留下的细观缺陷开始,在服役荷载与极端灾害环境的交互作用下,局部损伤演化从微/细观发展到宏观,造成结构劣化乃至发生灾变。也就是说,损伤演化造成结构灾变的因与果分别属于不同尺度、不同层次,实际上是跨越了微、细、宏观量级的空间尺度上和从材料层次到构件层次再到千米级结构层次。另一方面,由于结构劣化过程漫长而持久,其间又有突发极端灾害导致的过载造成损伤突变与长期累积疲劳损伤交互作用,损伤演化过程分析所需涉及的时间尺度也是多量级的。由于

工程结构从结构形式到服役环境都是独一无二不可复制的,其构形复杂、体量巨大,无法进行足尺结构损伤试验,也给损伤分析研究带来困难。由此可见,虽然预测和防止结构失效的任务是在结构这一最顶层,但是损伤演化却是起源于最低层,即材料微损伤。材料在微观或细观尺度上的损伤经过在多个不同尺度的物质、构件和结构层次上的演化,最终导致结构整体的破坏,认识这样的结构多尺度跨层次损伤演化过程的机理是解决结构安全服役的核心科学问题。

由上述分析可见,随着土木结构的发展、安全运营要求和 SHM 系统的兴起,给大型结构安全性设计和损伤过程分析带来了前所未有的需求,也提出了全新的科学问题。由于作用在上千米的结构上的载荷、整体响应与损伤起源处的小于毫米级的微观细观缺陷在分析尺度上相差甚远,其结构响应和局部损伤过程必然需要采用不同的尺度、不同的理论去分析。如果仍然按现有方法在同一尺度上进行,必然使得分析结果与实测结果相去甚远。大型土木结构如大跨桥梁、大型场馆、超高层建筑物等,其构件尺度已是通常的宏观尺度,整体结构尺度则达到千米以上。由于这类结构在建造和施工过程中很难避免不出现任何缺陷,通常细观层次上的缺陷就难以被现场监理发现。这些细观缺陷必然会在结构运营载荷的作用下产生局部应力集中和损伤演化;一旦出现这种情况,那种材料中的空洞、微裂纹就不会成为结构损伤与失效的主导因素,而由结构建造过程中遗留的先天性细观缺陷引起的损伤演化来取代。因此,对于大型土木结构而言,传统上的单一分析尺度内的模拟和计算已经无法达到结构损伤演化过程分析的目标,必须进行损伤多尺度模拟和计算。在这里,涉及的空间尺度量级应该为从微观尺度(10^{-6} m)或细观尺度(10^{-3} m)到结构全尺度(10^3 m)。但是,有关大型土木结构劣化过程的多尺度模拟与分析方法的研究目前还很少见到。除了大量的关于材料特性多尺度模拟的研究外,有一些关于结构体系的多尺度、多物理现象模拟也并未涉及大型土木结构。

研究在结构损伤预后分析中所迫切需要解决的若干结构多尺度力学关键问题,主要围绕如何模拟损伤从材料与结构中的细观层次的缺陷(工程监理在现场无法发现的)演化发展到结构局部损伤乃至整体失效过程的分析方法与理论。它与材料性能与强度领域的多尺度问题有共性,也有其个性。其本质问题是跨越细观、宏观与千米级结构尺度的损伤多样性及其强耦合,主要个性是不同尺度损伤及其演化的相互关联、强耦合作用及其结构形式相关性,表现为损伤在细观、宏观和结构尺度上存在不同的特征与现象,其演化过程有不同的物理机理,对结构响应和失效过程产生不同的影响和重要作用。当小尺度上的损伤程度较低时,宏观和结构尺度上的响应是线性的,但当小尺度上损伤演化到一定程度(出现局部裂纹或塑性铰),在应力重分布的推动下,大尺度上的响应机理将变为非线性,构件失效进而引发结构传力特性和路径的改变,而结构传力特性和路径的改变和结构中应力重分布,又势必影响小尺度上的应力场及其控制的损伤演化过程。

多尺度模拟也是目前国际上正越来越受到关注的仿真工程学(Simulation Based Engineering Science, SBES)^[1]的核心问题之一。SBES 涵盖工业、国防、医疗、国土安全、能源与环境、材料、工程师教育等等几乎所有工程领域,关系到未来工程科学的发展,其研究过程将涉及和有望解决一大批基础研究问题。SBES 的核心问题包括复杂工程结构体系的多尺度模拟和仿真方法,以及在指定精度和可靠性下获得仿真分析结果。它的发展将提供对工程结构体系多尺度、多物理现象和行为的理解与控制;成为各领域基础研究发展的虚拟工具,

大大提高计算机模拟和预估能力,从而极大地惠及工程科学的每一分支。在计算机技术飞速发展的现代社会,目前 SBES 发展的最大阻碍不是来自硬件而是来自多尺度模拟和分析(Multi-Scale Modeling and Simulation, MSM & S)的挑战。

由此可见,解决大型土木结构劣化过程中的损伤多尺度模拟和分析问题,实际上也是要针对大型土木结构损伤分析的需要,解决土木工程领域的仿真工程学(SBES)中的若干关键力学问题。这些关键力学问题的解决还有望推动我国土木工程领域仿真工程学的发展,因为在我国,SBES 尚未系统性地开展研究。然而,在美国已经是作为“为了在世界上维持未来工程科学中领先地位的国家级优先发展领域”^[1]开展系统性的攻关和研究。由此,本书所介绍成果的科学意义自是不言而喻。此外,结构建模的终极目标应该和材料本构模拟一样,预测工程结构体系在无法试验条件下的行为和响应及其成因。当前这样的目标虽然在汽车、机械、航空等行业中已经可以部分实现,但对于大型复杂土木结构而言似乎还难以实现。究其根源,美国土木工程师学会(ASCE)的一个报告中曾经通过案例分析做了专门比较发现了其原因^[2]。该学会十多年后发布的报告中仍然指出^[3]，“现在关于土木结构系统的承载能力、服役行为的认识严重不足,尤其是既有结构在长期服役以后的实际荷载传递机制、内力分布、失效模式与剩余寿命等方面的分析,其预测结果的误差之大往往是在数量级方面就是不可接受的”。可以预期的是,在多尺度模拟和分析的框架下,再借助于 SHM 系统输出的结构在线响应信息,假以时日,大型土木结构建模的终极目标——预测结构在极限状态下的行为和失效路径也可望达到。同时,结构跨时空尺度模拟中的关键力学问题的解决,也将给结构力学、计算固体力学和损伤、破坏机理等等力学相关学科的发展带来新的活力。

在工程应用方面,本书所致力于的科学问题的解决,无疑将对于大型土木结构的安全性评估和损伤失效过程分析具有很好的应用前景。如同 SBES 发展的最大阻碍不是来自硬件,目前重大土木工程结构健康监测发展的主要阻碍也不在于 SHM 系统本身,而在于相应的结构健康评估(Structural Health Evaluation, SHE)理论和方法^[4]。现有损伤检测方法之所以对结构中的小损伤或者劣化过程无能为力,是因为这些方法都是基于单一尺度上的结构模拟和系统识别(System Identification, SI)之上。事实上,现在的 SHM 系统的监测目标都是整体与局部相结合的(在监测结构整体响应和状态方面有加速度计、位移计、倾斜仪和 GPS 等,在监测局部响应和状态方面有应变计、光纤传感器和腐蚀传感器等),但是目前能够有效地用于结构识别的还仅限于以加速度计为主的整体响应信息,究其根源恐怕是因为模拟和分析方法、SI 理论都是建立在单一尺度上的,给综合利用 SHM 系统输出的整体与局部信息进行损伤检测和状态识别带来阻碍。由此可见,SHM 发展和广泛应用的突破口在于研究与建立多尺度结构识别和状态评估理论与方法。在这种局面下,亟须专门投入力量,研究重大土木结构基于健康监测信息的时空多尺度模拟和分析理论、方法及其实施策略,推动大型土木结构损伤检测和状态评估领域的基础性理论研究有大的突破,并应用于结构安全评估系统的建立,以保证重大土木工程结构的安全运营。

针对当前相关领域的研究现状,和结构损伤演化过程分析中面临的若干关键科学问题,我们提出了如图 1.1 所示的结构损伤多尺度模拟与分析的研究技术路线,并围绕该技术路线全面展开了各类大型土木结构损伤多尺度模拟与分析研究工作。这些已完成的研究工作成果系统地汇总于本书中,因此本书的主要内容包括:

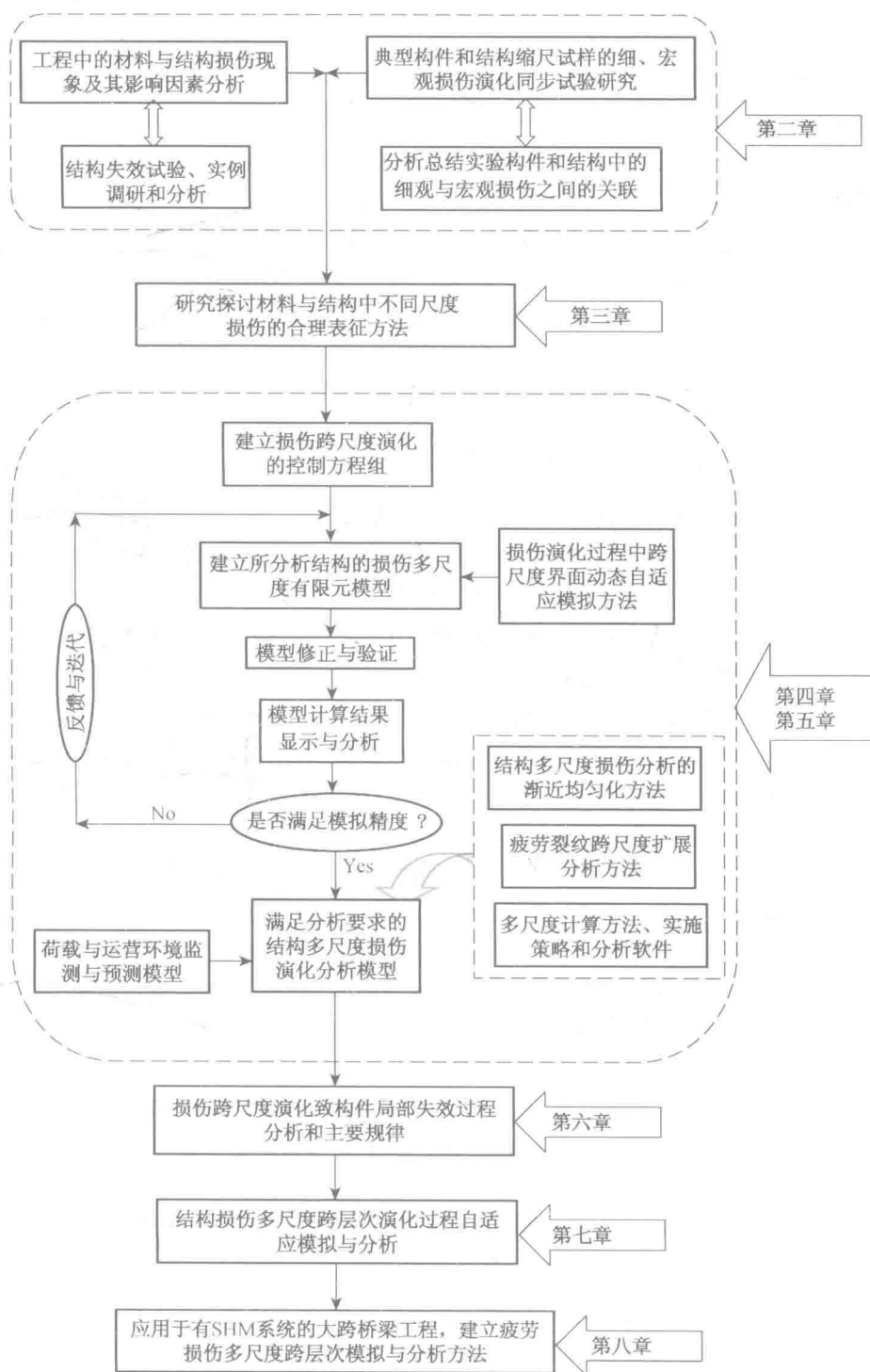


图 1.1 结构损伤演化多尺度分析的主要技术路线以及相关章节之间的关系

(1) 探讨材料与结构中不同尺度上的损伤的合理表征方法,能够恰到好处地抓住那些在其所属尺度上的损伤特征,避免太多以致无法处理,又不能太少以免丢失会影响宏观大局的关键特征,并将其显著影响结构响应与失效过程的特征量与宏观力学方程恰当地耦合起来;

(2) 重点针对一至两类结构形式中的典型构件或结构构形,研究跨越(细观到宏观和/或结构尺度)两到三个尺度损伤之间的关联,研究建立跨尺度演化的广义场方程组并进行全耦合求解的一致多尺度分析方法和计算技术;

(3) 研究结构多尺度损伤分析的渐近均匀化方法,以分析结构服役初期在局部应力集中处材料细观损伤导致局部失效的机理和对整体结构响应的影响;

(4) 研究裂纹尖端的细观损伤和细观裂纹演化导致宏观扩展的疲劳裂纹扩展的多尺度描述方法,以分析结构在疲劳载荷下的多尺度损伤机理和结构疲劳失效过程;

(5) 研究结构服役过程中的各类突发过载(如交通超载、台风、地震等)对结构多尺度损伤演化过程的影响,研究在结构多尺度损伤演化过程的全耦合算法中计入突发过载造成的扰动及损伤速率突变的方法;

(6) 研究结构局部损伤演化过程致构件失效和结构整体破坏过程的自适应模拟与分析方法,以分析包括结构损伤诱发应力重分布、进而引发结构传力特性和失效路径改变的机理;

(7) 在上述研究工作的基础上,研究基于结构多尺度损伤分析的结构损伤预后分析模型与分析方法,并将其应用于已安装了结构健康监测系统、具有可靠监测数据的一类大跨桥梁结构。

上述主要内容均围绕图 1.1 给出的研究技术路线在本书各章中详细展开阐述;同时,图 1.1 也表示了研究技术路线与各章之间的关系。需要特别说明的是,在如图 1.1 所示的技术路线中,结构损伤模拟中的部分内容(如模型修正与验证、荷载与运营环境监测与预测模型等)是在本书第 4、5 章没有涉及的,其原因是这些内容已经在作者的前一本书《在役桥梁结构疲劳监测与评估》^[5]中做了介绍。对这些内容有兴趣的读者可以去读一下那本书中的相关章节。

本书的出版可望将作者及其研究团队多年来在结构损伤多尺度模拟与分析领域的研究成果在学术界和工程界得到进一步的发展和应用,从而发挥其科学价值和社会经济意义。书中介绍的研究成果一方面专注于结构损伤多尺度模拟与分析中的基础性科学问题的突破,包括揭示材料与结构在不同尺度上损伤演化的主要特征,不同尺度下损伤的合理表征及其跨尺度演化率,结构损伤跨尺度耦合的控制方程及其并发计算方法等;另一方面,针对大型土木工程结构在服役载荷(包括正常运营载荷与突发地震、台风等)作用下的损伤演化机制和主要规律发展损伤演化过程的多尺度模拟与分析方法。这两方面成果可为建立大型土木结构多尺度损伤分析系统以保障结构全寿命安全奠定理论基础。同时,将结构损伤多尺度模拟与分析的结果与结构监测信息结合和互补可有助于捕捉现有结构损伤检测方法无法企及的小损伤演化过程并揭示结构失效机理,也使结构状态(损伤)的识别和健康诊断不仅仅依赖有限个数传感器在有限时间输出的信息,这一思路有可能成为解决当前结构健康监测“瓶颈”问题的重要途径,其立意触及结构健康监测与安全评价工程需求中的关键力学问题也是核心的基础科学问题;由此创建的损伤分析系统将可望达到让 SHM 系统真正发挥

作用以确保结构安全的目标。

本书中系统总结了一些结构损伤预后分析中涉及的结构多尺度力学基本概念、基本理论和分析方法。这些针对结构损伤预后分析的需要开展的结构多尺度研究,与目前国内外广泛兴起的针对材料性能优化和材料强度与失效问题的多尺度力学有部分共同的科学问题,但更有其个性问题。对这些有别于其他多尺度力学的个性科学问题的系统性研究是本书独有的特色,相关的一些论文成果已经在国内外引起了较大关注。美国 Los Alamos 国家实验室的综述报告^[6]中,对现有的各种损伤诊断方法进行了对比,认为我们的思路具有先进的建模和构架(Advanced Modeling and Architectures)以及预后疲劳寿命的能力(Elements of Prognosis Capability)。在此学术思路指导下完成的桥梁结构疲劳损伤分析和桥梁结构多尺度模拟方法方面的研究成果,已经获得了国家科技进步二等奖和江苏省科技进步一等奖。

概要而言,本书所介绍的新成果的科学意义在于,这些成果增加了我们对大型工程结构损伤跨尺度演化规律、失效过程、失效路径和临界状态的了解,其理论发展可望给土木结构全寿命安全带来如下的应用前景:

(1) 揭示结构损伤多尺度、跨层次非线性演化致结构失效的机理 相关的理论研究的突破将揭示大型土木结构损伤多尺度、跨层次演化与失效机理,填补当前在这方面的空白,从而改变目前大型土木基础设施工程无法预知结构中潜在损伤状况、局部失效危险性和安全可靠性的现状。

(2) 发展可靠的大型土木结构损伤预后方法 损伤预后可提前预见结构中潜在损伤演化的过程及其后果,以便在损伤演化从材料层次发展到构件或结构层次以前即可成功地对结构服役性能劣化程度进行预见性的评估;通过预后主动把握结构损伤多尺度、跨层次演化的过程及其在结构性能劣化过程中表现的行为特征,对在役和拟建大型土木结构建立损伤预后系统,启动大型土木结构全寿命周期中状态可知、可控、从而有针对性地维护管理的新时代。

(3) 建立基于损伤预后的大型土木结构全寿命安全的理论体系 该理论体系可涵盖设计、服役、防灾减灾等结构全寿命周期中关键环节,包括基于预后的结构“损伤性能”设计计算理论、服役环境下结构损伤跨层次演化致灾预期和基于预后的结构剩余寿命评估,从而为大型土木结构全寿命周期安全从设计、服役和防灾减灾的每一环节提供“治结构之未病”的理论基础。