



钢筋混凝土梁桥 疲劳性能评估

FATIGUE PERFORMANCE EVALUATION OF
REINFORCED CONCRETE GIRDER BRIDGES

钟铭 著

中国建筑工程出版社

主编：(1) 主编：主编

钢筋混凝土梁桥疲劳性能评估

钟 铭 著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢筋混凝土梁桥疲劳性能评估/钟铭著. —北京: 中国
建筑工业出版社, 2019. 2
ISBN 978-7-112-23086-0

I. ①钢… II. ①钟… III. ①钢筋混凝土桥-梁
桥-疲劳寿命-评估 IV. ①U448.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 290678 号

本书介绍了作者近十年来在钢筋混凝土梁桥材料、构件疲劳损伤理论和损伤后承载性能评估方面的研究成果, 主要内容分为试验研究、理论分析和实用评估技术三个部分。试验研究部分包括高强钢筋和高强混凝土梁高周疲劳试验, 超载作用下钢筋混凝土梁疲劳性能分析, 钢筋混凝土柱低周疲劳损伤后的静力和动力性能试验; 理论分析部分主要包括基于裂纹扩展机理的混凝土损伤有效弹性模量、强度评估方法和建立细宏观相结合的混凝土损伤分析模型, 钢筋混凝土受弯、剪弯构件疲劳累积损伤性能分析方法, 钢筋混凝土梁损伤识别方法等; 实用评估技术部分包括既有结构混凝土累积损伤原位评估方法与指标, 疲劳损伤后钢筋混凝土梁桥构件承载性能评估技术, 钢筋混凝土桥墩损伤后承载性能分析案例。

本书可供工程科研、设计、维修人员和从事土木工程检测评估领域的专业技术人员, 以及相关专业大学教师、学生阅读和参考。

责任编辑: 李笑然 刘瑞霞

责任设计: 李志立

责任校对: 张颖

钢筋混凝土梁桥疲劳性能评估

钟 铭 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15 $\frac{3}{4}$ 字数: 312 千字

2019 年 3 月第一版 2019 年 3 月第一次印刷

定价: 52.00 元

ISBN 978-7-112-23086-0

(33167)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

混凝土桥梁、吊车梁、混凝土坝体等钢筋混凝土结构,在长期重复疲劳荷载的作用下,结构构件抗力会随疲劳损伤的累积而衰减,加之外部自然环境的不利影响,结构功能不断退化直至失效。19 世纪 20 年代末,法国人 Albert 对矿山卷扬机焊接链条进行的试验,拉开了疲劳现象研究的序幕,随着新的工程问题的出现和研究的深入,疲劳引起结构脆性破坏的问题在理论界和工程界受到高度重视,国内外在金属材料、机械、航空航天、铁路桥梁等领域的疲劳研究取得了大量成果。美国材料与试验学会 (ASTM) 给出的疲劳定义为:材料在波动应力或应变作用下,波动达到一定次数后产生局部损伤并逐步达到破坏峰值的过程;英国桥梁规范 BS 5400 给出的疲劳定义为:在单独作用时不足以引起失效的应力重复作用下,结构逐渐产生开裂并失效的现象。

混凝土材料自诞生以来就以结构稳定、耐久性高等优良特性广泛应用于桥梁等工程建设领域。以国内外已建成的桥梁结构为例,混凝土桥梁所占比例分别为:欧洲 70%、美国 52%、日本 60%。当前我国桥梁总量已经突破百万座,其中混凝土桥梁的比例更是高达 90% 以上。随着设计方法的进步、轻质高强材料的应用,桥梁建设得到了长足发展,然而,由于重载交通不断加剧,长久以来在钢结构桥梁中关注较多的疲劳问题也在混凝土桥梁中逐渐显现。1961 年建成的纽约 Throgs Neck 桥,通车不到 10 年桥面板就已经显著开裂,经调查分析,是因为支撑桥面板的悬臂梁发生了反复挠曲变形,致使上部的混凝土桥面板中产生了二次疲劳拉应力而开裂;2000 年 5 月 20 日,美国加州北部 Motor Speedway 桥梁因钢筋锈蚀疲劳破坏倒塌;2011 年 7 月,杭州钱江三桥发生桥面断裂坍塌事故,事故主要是由该桥长期在超限超载车辆运营下造成空心板梁出现疲劳损伤且未有效维修所致。与长大跨径桥梁相比,中小跨径桥梁所承受的车辆等活荷载占总荷载效应比重大,加之超载问题的客观存在,车辆荷载产生的应力变幅引起的疲劳效应更为突出。我国中小跨径桥梁占据了桥梁总量的绝大多数,以公路桥梁为例,截至 2017 年年底,中等跨径桥梁所占比例约为 22%,小桥约占 69%。因此,中小跨径桥梁的疲劳问题更值得关注。

长期以来,国内外学者对混凝土疲劳破坏问题进行了大量研究,逐步形成了从试验研究到疲劳断裂分析,再到疲劳损伤力学分析的研究模式。基于试验的研究,主要是通过疲劳加载试验得到试件的 $S-N$ 曲线或 $\epsilon-N$ 曲线,进而评估混凝土材料或结构在特定应力幅或应变幅下的疲劳寿命。这类研究方法往往只关注试

件的最终疲劳寿命,对疲劳损伤的非线性发展过程缺乏认识,因而无法用于分析混凝土结构的疲劳破坏全过程。混凝土的疲劳破坏过程实际上是混凝土中的微裂纹不断萌生、扩展和形成宏观非稳定裂缝的过程。基于该物理现象,断裂力学模型被引入混凝土结构的疲劳破坏分析,并与有限元方法相结合,模拟试件的疲劳断裂过程,该方法大多只关注单个预留宏观裂缝的疲劳扩展,而忽略了加载前期混凝土中大量微裂纹的发展过程,因而无法用于精细化模拟混凝土结构的疲劳过程。为充分考虑混凝土疲劳破坏过程中微裂纹扩展的影响,将损伤力学模型引入混凝土疲劳破坏的分析中,该方法通过引入损伤内变量及演化来描述混凝土由于微裂纹的萌生、扩展而导致的宏观性能劣化直至失效的过程,从而实现了基于疲劳本构模型研究混凝土结构的疲劳破坏问题。这些研究取得的成果为钢筋混凝土桥梁疲劳设计和损伤性能评估奠定了一定的理论基础,然而目前的疲劳研究有优点也有局限性,局限性主要体现在以下特征中的一个或多个:(1)按混凝土的应力幅或应变幅来计算疲劳损伤度,没有从本质上考虑混凝土疲劳损伤;(2)模型中的参数值较多,其取值不仅与材料特性有关,而且与荷载特性有关;(3)没有考虑荷载加载次序的影响。由于实际钢筋混凝土桥梁的作用历程往往不知,损伤后的应力重分布,以及在服役过程中受疲劳、徐变、温度和收缩等多种时变效应的非线性耦合影响,使得既有钢筋混凝土桥梁的累积损伤程度评估更为复杂,采用简化的疲劳累积损伤分析方法预测结果往往与实际相差很大,所以既有钢筋混凝土桥梁疲劳后的性能评估仍遇到巨大的挑战。

近年来,随着世界范围内既有桥梁在频繁超载、环境侵蚀等综合因素作用下导致的失效坍塌的事故频发,桥梁累积损伤问题越来越突出。中国、美国、日本等国家纷纷提出了桥梁长寿命安全保障计划,如何量化评估综合损伤后的桥梁承载性能是其中的关键问题。在现有桥梁评估体系中,虽然各国对既有钢筋混凝土桥梁的安全性评定已形成较为完善的规范体系,一般通过结构检测结合检算分析,必要时进行荷载试验来完成。然而从桥梁材料、外观进行技术状况评定,只能定性评定结构的工作状况,难以反映内在的承载能力,且受主观因素影响较大。另外,荷载试验投入大、周期长、影响交通,且其本质是由弹性行为反映极限行为,由刚度估算承载性能,由于结构损伤的发生和发展过程是一个典型的非线性过程,严格来讲,这种以弹性理论为基础的损伤识别和评估方法不适用于非线性结构,其理论基础非常牵强。在无损检测技术方面,国内外进展较大,期待通过反映结构的内部损伤,建立损伤模型分析评估损伤结构性能,但无损检测方法必须建立在被检测的某些性能与适当的物理量之间相互关系的基础之上,一般采用两种方法:一是建立在大量试验基础之上的归纳法,即用回归分析方法确定检测性能与要评价量之间的经验关系,这种方法不仅工作量巨大,受限制的客观因素多,而且经常有一定的主观盲目性,主要用于无损检测技术的初期的理论研

究;另一种是以基础科学的基本原理为依据的演绎法,以要评价量与物理量之间的理论联系为基础进行逻辑推理,从理论上确定其间的相互关系,然后再做适当的试验验证,这种方法已经被认为是无损检测技术理论研究方向极具前途的方向。因此,结构累积受损后的原位无损检测与性能评估技术是土木工程领域重要而紧迫的课题之一。

本书介绍了作者近十年来在钢筋混凝土梁桥疲劳性能评估理论和应用技术的研究成果。第1章介绍了钢筋混凝土梁桥疲劳性能评估的背景、研究现状及发展趋势。第2章提出了高周疲劳作用下高强混凝土梁的裂缝宽度、正截面应力计算方法和高强钢筋疲劳强度的建议公式。第3章讨论了超载作用对钢筋混凝土梁承载性能的影响和劣化特征。第4章分析了钢筋混凝土柱在低周反复荷载作用下的损伤发展及循环完成后的受弯和轴心受压静力性能。第5章提出了钢筋混凝土剪弯构件考虑低周疲劳损伤的变形性能计算方法,建立了刚度和抗力衰减的计算公式。第6章提出了基于细观裂纹扩展机理的混凝土损伤性能评估方法,讨论了裂纹扩展特征与混凝土有效弹性模量、强度的关系。第7章建立了细宏观相结合的混凝土损伤分析模型,提出考虑低周疲劳效应的钢筋混凝土柱全过程损伤性能分析方法。第8章分析了低周疲劳损伤对钢筋混凝土柱刚度和阻尼比的影响,建立了与刚度损伤相联系的阻尼比统计计算公式。第9章提出了基于应变测试量的钢筋混凝土梁损伤识别方法,和一种只需低阶模态即可精确求解损伤程度的解析解方法。第10章提出了基于实测弹性模量的结构混凝土疲劳损伤后残余应变计算方法和损伤指标,以及强度估算方法。第11章提出了钢筋混凝土梁桥永久荷载下的现存应力、应变状态和剩余承载力分析方法。第12章给出了一个钢筋混凝土桥墩损伤后承载性能详细分析案例。本书是一个阶段性的成果,其中一些观点仅代表作者当前对上述问题的认识,有待进一步补充、完善和提高,深切希望能得到我国工程结构广大设计、维护技术专家的批评指正。

本书的研究工作得到了北京交通大学王元丰教授的指导,第9章为合作学者天津城建大学张辉东教授的研究成果,同时借鉴参考了国内外有关专家的研究成果,在此一并表示感谢!

由于时间仓促,水平所限,书中错误与疏漏之处在所难免,敬请广大读者不吝指教。

钟 铭

2018年4月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 混凝土损伤力学的研究进展	2
1.3 混凝土细观损伤力学研究现状	4
1.3.1 细观损伤理论研究方法	4
1.3.2 混凝土细观损伤模型	5
1.3.3 混凝土细观损伤研究在结构应用中存在的问题	8
1.4 混凝土材料层次的累积损伤理论研究现状	9
1.4.1 混凝土疲劳损伤物理机理	9
1.4.2 混凝土应力—应变包络损伤原理	10
1.4.3 混凝土疲劳的累积损伤理论	10
1.5 混凝土构件疲劳损伤后性能评估	13
1.5.1 混凝土疲劳损伤评估	13
1.5.2 混凝土梁疲劳损伤后承载性能评估	14
1.5.3 混凝土梁动力参数评估方法	15
1.6 钢筋混凝土构件地震损伤评估方法	16
1.6.1 钢筋混凝土构件地震损伤评估模型	16
1.6.2 钢筋混凝土构件地震损伤评估中存在的问题	18
1.7 本书主要内容	20
参考文献	22
第 2 章 钢筋混凝土梁常幅疲劳性能试验研究	28
2.1 引言	28
2.2 试验概况	28
2.2.1 试件设计	28
2.2.2 试验方法	29
2.2.3 钢筋混凝土梁试验结果	30
2.3 钢筋混凝土梁的静载试验分析	30
2.3.1 关于平均裂缝间距 l_m 计算的建议	31
2.3.2 钢筋混凝土梁裂缝宽度计算	32
2.4 钢筋混凝土梁疲劳试验分析	32

2.4.1 正截面疲劳性能	32
2.4.2 混凝土弯曲受压的变形模量 E_w 和疲劳变形模量 E_w^N	33
2.4.3 疲劳荷载作用下的裂缝宽度和挠度发展规律	34
2.5 基于试验统计的钢筋混凝土梁变形性能计算方法	36
2.5.1 疲劳荷载作用下裂缝宽度的计算	36
2.5.2 基于换算截面的疲劳刚度计算	41
2.6 受弯试件正截面压区混凝土及受拉钢筋的应力计算	43
2.7 基于解析刚度法的钢筋混凝土梁疲劳刚度分析	44
2.7.1 循环次数—挠度 ($N-f$) 曲线	44
2.7.2 疲劳刚度计算	45
2.8 梁内受拉钢筋的疲劳强度分析	47
2.9 结论	48
参考文献	49
第3章 超载作用下钢筋混凝土梁疲劳性能试验研究	50
3.1 引言	50
3.2 试验设计	51
3.2.1 试件设计	51
3.2.2 加载方式	53
3.2.3 测点布置	54
3.3 承载性能试验结果及分析	55
3.3.1 超载对挠度的影响分析	55
3.3.2 超载对裂缝特征的影响	60
3.3.3 超载损伤对极限承载力的影响	65
3.4 超载运营对钢筋混凝土桥梁承载性能的影响讨论	66
3.5 结论	67
参考文献	67
第4章 钢筋混凝土柱低周疲劳损伤后静力性能试验研究	69
4.1 引言	69
4.2 试验概况	69
4.2.1 试验目的	69
4.2.2 试验模型设计	69
4.2.3 材料参数	70
4.2.4 试验加载	71
4.3 试验结果分析	72
4.3.1 钢筋混凝土柱损伤发展特征	72

4.3.2 低周疲劳作用下试验柱损伤性能分析	74
4.3.3 低周疲劳循环后模型柱损伤分析	76
4.4 结论	79
参考文献	79
第5章 钢筋混凝土剪弯构件的低周疲劳累积损伤性能研究	81
5.1 引言	81
5.2 剪弯构件的低周疲劳变形性能衰减规律	82
5.2.1 基于残余变形的割线刚度损伤分析	82
5.2.2 低周疲劳作用下剪弯构件割线刚度、抗力的计算	85
5.3 残余变形的影响参数分析	86
5.3.1 轴压比的影响	87
5.3.2 纵筋配筋率和强度的影响	88
5.3.3 剪跨比的影响	89
5.3.4 箍筋配筋率的影响	89
5.4 低周疲劳损伤对剪弯构件极限变形的影响分析	89
5.4.1 低周疲劳效应对钢筋混凝土柱极限变形的影响	89
5.4.2 考虑低周疲劳损伤的剪弯构件极限变形折减计算方法	89
5.5 结论	91
参考文献	92
第6章 基于裂纹扩展机理的混凝土损伤性能评估方法	93
6.1 引言	93
6.2 裂纹体有效弹性模量的计算方法	93
6.2.1 自洽方法	93
6.2.2 微分方法	94
6.2.3 有效介质方法	94
6.3 混凝土裂纹演化方程	96
6.4 混凝土损伤本构模型	98
6.4.1 单轴拉伸	98
6.4.2 单轴压缩	99
6.5 裂纹角度对混凝土有效模量和强度的影响	99
6.5.1 单轴拉伸	99
6.5.2 单轴压缩	99
6.6 初始裂纹损伤的估计方法	104
6.7 结论	104
参考文献	105

第 7 章 钢筋混凝土柱低周疲劳全过程累积损伤性能分析方法	107
7.1 引言	107
7.2 基于细观机理的混凝土损伤模型	108
7.2.1 模型建立	108
7.2.2 Mander 模型	109
7.2.3 本章模型与 Mander 模型的比较	110
7.3 钢筋混凝土柱的单调荷载—变形关系	112
7.3.1 钢筋混凝土柱的曲率延性分析	112
7.3.2 钢筋混凝土柱荷载—位移分析	115
7.4 钢筋混凝土柱的低周疲劳变形损伤性能计算方法	117
7.4.1 纵筋低周疲劳损伤分析	117
7.4.2 钢筋混凝土压弯构件低周疲劳作用下变形性能损伤计算公式	118
7.4.3 以割线刚度损伤为基础的压弯构件变形性能衰减分析	119
7.5 钢筋混凝土柱低周疲劳累积损伤后的受弯承载能力分析	120
7.5.1 分析过程	120
7.5.2 算例分析	121
7.6 结论	124
参考文献	124
第 8 章 钢筋混凝土柱低周疲劳损伤后动力性能试验研究	127
8.1 引言	127
8.2 测试方法及典型动测试验曲线	128
8.2.1 No. 4 柱各阶段动测试验曲线及频谱分析	128
8.2.2 No. 6 柱各阶段动测试验曲线及频谱分析	130
8.3 低周疲劳损伤对钢筋混凝土柱动力特性的影响分析	132
8.3.1 试验结果分析	132
8.3.2 钢筋混凝土柱动刚度损伤与阻尼的关系研究	139
8.3.3 钢筋混凝土柱静刚度损伤与动刚度损伤的统计关系	141
8.4 结论	144
参考文献	145
第 9 章 钢筋混凝土梁损伤后识别方法研究	146
9.1 一种基于应变测试量的结构损伤识别方法	146
9.1.1 损伤特征信息提取的理论依据	146
9.1.2 修正算法	148
9.1.3 损伤分析	148
9.1.4 损伤程度估计	152

9.1.5 结论	154
9.2 结构损伤程度识别方法	154
9.2.1 结构损伤定位方法	154
9.2.2 结构损伤程度确定	155
9.2.3 损伤程度指示因子的精确求解	155
9.2.4 算例分析	156
9.2.5 结论	160
参考文献	160
第 10 章 既有结构混凝土累积损伤原位评估方法	163
10.1 引言	163
10.2 混凝土弹性模量参量的选择	164
10.3 基于混凝土疲劳包络线的残余应变与静力等效应变关系	166
10.4 基于混凝土实测弹性模量的静力等效应变分析方法	167
10.5 混凝土累积损伤程度评估	170
10.5.1 混凝土损伤指标的比较	170
10.5.2 混凝土累积损伤等级评定	172
10.6 基于弹模比的混凝土累积损伤快速评估方法及验证	173
10.7 结论	174
参考文献	174
第 11 章 疲劳损伤后钢筋混凝土桥梁承载性能实用评估方法	176
11.1 引言	176
11.2 钢筋混凝土桥梁永久荷载下的工作状态	177
11.3 钢筋混凝土桥梁疲劳损伤后剩余承载力分析方法	178
11.4 钢筋混凝土桥梁应力相关裂缝宽度的分离技术	180
11.4.1 基于裂缝特征评估结构承载能力存在的问题	180
11.4.2 永久荷载下的应力相关裂缝宽度分离方法	181
11.5 结论	185
参考文献	185
第 12 章 钢筋混凝土桥墩损伤后承载性能分析案例	187
12.1 工程概况及分析方法	187
12.1.1 工程概况	187
12.1.2 分析方法	189
12.2 桥墩分析模型	189
12.2.1 截面条带划分	189
12.2.2 分析模型建立	191

12.2.3 计算原理	191
12.3 基于损伤的混凝土桥墩截面抗弯承载能力分析	192
12.3.1 第一级加载作用下的模量折减和弯矩—曲率关系	193
12.3.2 编制程序计算各条带损伤后的模量以及截面曲率—弯矩关系	197
12.3.3 各级加载作用墩底截面混凝土模量折减和弯矩—曲率关系计算结果	201
12.4 基于损伤的混凝土桥墩荷载—位移关系	203
12.4.1 基于损伤的混凝土桥墩荷载—位移关系的计算	203
12.4.2 荷载—位移关系图形	209
12.5 依据现有规范分析桥墩的抗弯承载能力和变形能力	209
12.5.1 桥墩的抗弯承载能力	209
12.5.2 桥墩的抗变形能力	211
12.6 损伤后混凝土桥墩性能分析与无损状态计算结果的比较	213
12.6.1 抗弯承载能力的比较	213
12.6.2 变形能力的比较	214
12.7 结论	215
本书主要结论与展望	217
附录 A 钢筋混凝土柱低周疲劳试验曲线	220
附录 B 试验柱动测试验曲线及频谱分析	226

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

随着我国桥梁建设事业的持续发展,工作重点也将逐步由建设周期转向养护管理和维修加固周期,而建立桥梁使用安全评估技术体系可以说是这一切工作的前提基础。据交通部门 2014 年底的统计,我国五类危桥总数已达 97000 多座,占桥梁总数比例的 13%。其中,由于运营车辆的快速增长、车型的变化,以及超载超限车辆的客观存在,超载载重可达车辆荷载重量的 100%~400%,导致桥梁出现结构损伤、整体性能下降及承载能力降低等突出问题,甚至时有车辆压垮桥梁事故的发生,每年由此带来的经济损失巨大。桥梁结构在使用期限内多次遭受超载作用,造成的损伤对桥梁结构产生多大的影响,是一个亟待解决的问题。

国外桥梁同样存在类似问题,据统计资料显示,美国从 1950~1994 年修建的 327740 座跨度大于 6m 的各类桥梁的结构中结构缺陷桥梁占 13.9%,法国、德国和英国需维修的桥梁分别占其桥梁总数的 39%、37%和 30%。因此,国内外对桥梁的安全状态非常关注,近期中国、美国、日本等国家纷纷提出了桥梁长寿命安全保障计划体系,桥梁承载性能评估技术及应用是其中的关键^[1]。

现在国内外对于超载作用对结构构件承载性能的影响和劣化机理尚无完善的理论。国内进行了少量超载作用对混凝土桥梁构件受弯性能的试验研究,仅从宏观上进行了剩余承载力和剩余刚度的分析,未对累积损伤产生的机理以及对结构的性能评价进行深入研究。在国内外目前的桥梁评估体系中,一般根据桥梁表观质量状况或结构检算分析进行技术状况评定和承载能力鉴定,而损伤后的结构安全评估始终是一个难题,尤其缺乏混凝土桥梁疲劳使用安全评估的系统研究。因此,正确评价桥梁的疲劳损伤机理及累积损伤对结构的性能评估具有重要的理论和现实意义。对损伤结构进行损伤估计、推断结构剩余承载性能和服役可靠度是结构维修、加固决策的重要基础。

另外,地震对桥梁的作用也造成结构的累积损伤,可以认为是一种“广义超载作用”。在桥梁抗震方面,美国学者 Bertero 等提出了基于性能的结构抗震设计理论 (Performance-Based Seismic Design, PBS D) 和相关延性设计方法^[2],形成了“小震不坏,中震可修,大震不倒”的三阶段设计水准,然而这是以桥梁

构件的损坏为代价的。在近几年来发生的几次大地震中,桥梁仍然遭到严重损坏,桥墩往往是破损的主要承力构件。目前,在地震对桥梁的影响研究工作中,多数都集中在桥梁的抗震性能方面,主要研究桥梁的抗震性能评价和减震方法。然而,在出现地震后,对承受过地震荷载的桥梁结构性能以及这些桥梁的功能恢复方面的研究却没有给予足够的重视。由于缺乏足够的理论支撑,在实际工程中也主要采用传统的评价和加固方法,并没有考虑震后桥梁的特点,这对工程的安全性和可靠性都存在着一定的不确定影响。

工程界普遍接受的地震损伤评估方法是建立在位移首次超越和塑性累积损伤联合效应的基础之上,即认为结构最大位移与累积损伤的破坏界限将相互影响,随着累积损伤的增大,结构最大位移的控制界限不断降低。反过来,随着最大位移的增大,结构累积损伤的控制界限亦不断降低。然而必须承认,基于这一大原则下的结构损伤分析还存在许多未解决的问题。材料损伤的定义、构件损伤中位移与累积耗能的组合形式、结构构件的损伤组合等,都是目前有争议的问题。而且,现有的构件地震损伤评估方法是作为破坏准则来应用的,其确定的损伤指标能反映震后结构的损伤程度,并不能直接表明震后结构的损伤性能,随损伤发展的动力问题研究还很少。因此,既考虑低周疲劳的影响,又与震后结构性能相联系的损伤性能评估方法需进一步研究。

由于基于材料损伤本构关系的结构损伤分析方法具有理论上的优越性,而且可以将超载作用和地震作用导致的结构累积损伤统一分析与评估,因此,本书从混凝土材料的损伤本质出发,研究混凝土累积损伤与有效弹性模量、强度的关系,提出结构混凝土原位评估方法和量化指标;在此基础上,研究钢筋混凝土构件低周疲劳全过程分析方法,以及既有混凝土桥梁累积损伤程度和实际应力状态的评定技术;进一步提出基于材质累积损伤的结构受力状态综合诊断技术和承载能力快速评估方法,为既有混凝土桥梁安全性鉴定和震后鉴定奠定基础。

1.2 混凝土损伤力学的研究进展

损伤力学是固体力学的一个分支学科,产生于实际工程对基础学科的需求。1958年,Kachanov^[3]最早提出用连续性变量描述材料受损的连续性能变化过程。此后Rabotnov^[4]将其推广,奠定了损伤力学的基础。但是此后损伤力学被冷落了十年左右,直到20世纪70年代,损伤概念再度受到重视,法国学者Lemaitre和Chaboche^[5]将连续介质力学和热力学结合起来研究了损伤对金属的弹性和塑性的影响。此后,瑞典的Hult^[6]、英国的Leckie^[7]研究了损伤和蠕变的耦合作用,还有Krajcinovic^[8-9]、Cordebois和Sidoroff^[10]等学者的工作为连续损伤理论

的形成和发展做了重要的贡献。

1981年欧洲力学协会(ENROMECH)在法国的Cachan召开了首届损伤力学国际讨论会。同年,我国对损伤的研究开始。此后20多年间,损伤理论蓬勃发展,在宏观唯象学框架和材料损伤本构行为的复杂连续介质描述等方面都有了较为成熟的研究成果。

最早将损伤力学概念应用于混凝土材料研究的是Dougill^[11]。现有的混凝土损伤模型基本上属于宏观损伤力学模型和细观损伤力学模型。宏观损伤力学模型的特点是引入损伤变量作为本构关系中的内变量。不同的研究者采用不同的损伤变量,大部分损伤变量是标量,即假定材料损伤是各向同性的。细观损伤力学模型是从材料的细观结构出发,对不同的损伤机制加以区分,通过细观结构变化的物理过程的研究材料破坏的本质和规律。例如,Lamaitre^[12]采用的损伤变量与有效应力相联系;Murakami(村上澄男)等^[13]从微裂纹的尺度和分布方面研究了微裂纹对于材料性能的影响。

在混凝土宏观损伤力学研究方面,Loland^[14]和Mazars^[15]分别以试验所得到的应力—应变曲线为基础,采用应变等价原理,建立了混凝土单轴损伤模型。Loland模型和Mazars模型是典型的弹性各向同性损伤模型,除此之外,分段线性损伤模型^[16]、分段曲线损伤模型^[17]等都属于这类损伤模型。此后,为了体现混凝土损伤的各向异性,以能量等价原理为基础人们又提出了一些各向异性损伤模型。具有代表性的这类模型有Sidoroff损伤模型^[18]、Krajcinovic^[19]损伤模型等。在研究三维载荷作用的损伤特性时,要给出三维应力状态时混凝土的损伤变量,仍然较为困难,目前常采用与Mazars模型类似的方法,即用各种不同表达方式的等效应变,以向三维情况推广。

另一方面,20世纪70年代,Gurson^[20]、Budiansk和O'connell^[21]等人的研究工作标志着细观损伤理论成为损伤力学的另一重要组成部分。这种方法是根据材料的微观(或细观)成分(如基体、颗粒、空洞)单独的力学行为以及它们的相互作用来建立宏观的考虑损伤的本构关系,进而给出损伤力学的完整的问题提法。损伤的细观理论是一种采用多重尺度的连续介质理论。其研究方法是两(多)段式的,首先从损伤材料中取出一个材料构元,它从试件或结构尺度上可视为无穷小,但包含了材料损伤的基本信息,无数构元之和便是损伤体的全部。然后对承受宏观应力作为外力的特定的损伤结构进行力学计算(这个计算需做各种简化假设),便可以得到宏观应力与构元总体应变的关系及损伤特征量的演化关系,这些关系既对应于特定损伤结构的本构方程,又可用它来分析结构的损伤行为。

细观损伤力学有较强的物理背景,能解释许多复杂的材料损伤行为。但是由于材料细观结构演化的复杂性,单从细观力学分析得到的损伤演化方程难以达到

很高的精度,而且对复杂加载情况下的损伤演化问题还缺乏研究。

目前,混凝土损伤力学的研究重点是损伤的宏、细、微观理论,这种研究正在成为追踪材料从变形、损伤到失稳或破坏的全过程,以解决这一固体力学最本质难题的主要途径。

1.3 混凝土细观损伤力学研究现状

1.3.1 细观损伤理论研究方法

1920年Griffith在研究玻璃等脆性材料时提出了断裂理论,1961年Kaplan^[22]首先将断裂力学的概念引用到混凝土中,并进行了混凝土的断裂韧度试验。此后数十年间,国内外学者在该领域进行了大量的理论和试验研究,取得了许多成果,并在工程实际中进行了较广泛的应用。然而,随着科学技术的发展,大量的研究也表明,断裂力学在混凝土材料的应用有其局限性,表现为断裂力学只研究固体中裂纹型缺陷扩展的规律,却无法分析研究宏观裂纹出现以前材料中的微缺陷或微裂纹的形成及其发展对材料力学性能的影响。对混凝土而言,其内部结构具有复杂的非均匀性和很强的无序性,要分析其受力后的变形和破坏过程,不但要研究已存在裂纹的扩展规律,而且要研究新裂纹的萌生、扩展以及裂纹间的贯通。细观损伤力学从某种程度上弥补了断裂力学的这种不足。细观损伤力学从材料的细观结构出发,对不同的细观损伤机制加以区分,通过对细观结构变化的物理与力学过程的研究来了解材料的破坏,并通过体积平均化的方法从细观分析结果导出材料的宏观性质。目前,基于细观损伤的混凝土力学性能的研究已成为国内外在该领域研究的重要途径。

混凝土材料的损伤是指在外荷载或环境变化的条件下,由于体内细观尺度的微缺陷如微裂纹、微孔洞等在荷载、温度或环境效应等因素持续作用下产生弥散裂隙并进一步增长、扩展、汇合,形成一定尺度的宏观裂纹,导致结构的强度、刚度下降。

细观损伤力学研究采用连续介质力学和材料科学的一些方法,对材料的细观结构如微孔洞、微裂纹、晶界等进行力学描述。细观损伤力学方法与连续介质力学方法的一个重要差别在于:在细观损伤力学方法中,必须采用一种平均化方法,以把细观结构损伤机制研究的结果反映到材料的宏观力学行为的描述中去^[23-25],然后,再通过细观尺度上的平均化方法将细观研究的结果反映到宏观本构关系、损伤演化方程、断裂行为等宏观性质中去,得到宏观应力与代表性体积单元总体应变的关系及损伤特征量的演化关系。

1.3.2 混凝土细观损伤模型

1. 微平面模型

美国西北大学 Bazant 教授^[26]于 1985 年提出了微平面模型。该模型的实质是认为在细观尺度下裂纹的开裂方向是任意的,对于混凝土而言,裂纹经常穿过骨料周围的界面,裂纹穿过的路径称为微平面,而微平面上的应变与总应变动态相关。因此,可以用微平面上的正应变或者剪应变作为表征损伤的内变量。该模型在概念上是非常明确的,表征了混凝土的损伤与裂纹扩展路径有关。Bazant 在该模型的基础上,提出了描述混凝土动态行为时考虑断裂速率和裂缝影响的微平面模型^[27]。加载速率变化对混凝土应力—应变关系的影响可通过以下两方面进行:(1)混凝土微裂缝的扩展速率;(2)混凝土材料现有裂缝之间的蠕变(粘塑性)。杜成斌和苏擎柱^[28]分析了该模型,认为其适合于冲击荷载作用下的侵彻问题,但是,该模型比较复杂,待标定的参数较多,其精确度有待验证,在实施和应用中往往比较繁琐。

2. 二维格构模型

格构模型的使用已经有 40 多年的历史,最初它被用来求解经典的弹性力学问题,由于当时的计算速度难以满足要求,格构模型仅仅是作为一个理论模型。直到 20 世纪 90 年代,Schlangen 和 Van Mier^[29]最先应用格构模型来模拟混凝土的逐渐破坏过程。在格构模型中,连续介质在细观尺度上被离散成由弹性杆或梁单元联结而成的格构系统^[30,31],每个单元代表材料的一小部分(如岩石、混凝土的固体基质)。网格一般为规则三角形或四边形,也可是随机形态的不规则网格,如图 1-1 所示。

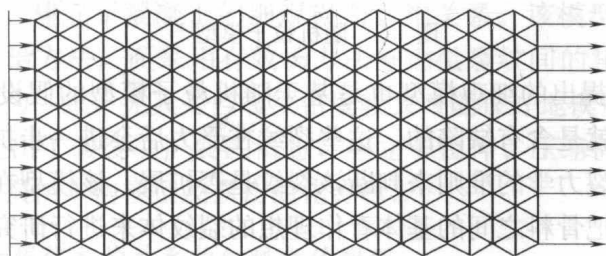


图 1-1 规则三角形格构模型^[31]

单元采用简单的本构关系和破坏准则(如弹脆性本构关系),并通过一定的方式描述材料的细观非均质性,如单元参数(弹模或强度)按某种统计规律分析计算时,在外载作用下对整体网格进行线弹性分析,计算出格构模型中各单元的