



土木工程精品系列

# 混凝土结构的 疲劳性能及设计原理

◎ 宋玉普 编著

Fatigue Behavior and Design  
Principle of Concrete Structures



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

土木工程精品系列

本书由大连市人民政府资助出版

# 混凝土结构的疲劳性能 及设计原理

**Fatigue Behavior and Design Principle  
of Concrete Structures**

宋玉普 编著



机械工业出版社

本书系统地总结了混凝土结构的疲劳性能和设计原理,反映了国内外在这一研究领域的最新进展以及本书作者的研究成果。全书共分10章,内容包括:疲劳荷载、混凝土的疲劳、钢筋的疲劳、构件和结构的疲劳性能和疲劳分析、各国规范对疲劳的处理方法、钢筋混凝土和预应力混凝土正截面和斜截面的疲劳承载力验算、钢筋混凝土受弯构件正常使用极限状态的疲劳变形和裂缝的验算。

本书可供从事交通、土木、海洋工程科研和设计工作的科技人员参考使用,也可供高等院校有关专业的教师和研究生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构的疲劳性能及设计原理/宋玉普编著.

—北京:机械工业出版社,2006.8

(土木工程精品系列)

ISBN 7-111-19093-9

I. 混... II. 宋... III. ①混凝土结构-疲劳性质

-研究②混凝土结构-结构设计 IV. TU37

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第044772号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:薛俊高 版式设计:张世琴 责任校对:陈延翔

封面设计:张静 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2006年7月第1版第1次印刷

169mm×239mm·12.125印张·2插页·468千字

0001—3500册

定价:48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线电话(010)68327259

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书是根据作者近年来参加国标《混凝土结构设计规范》的撰写中承担“疲劳验算”一章的任务和负责国家自然科学基金“混凝土的多轴疲劳破坏准则”项目所积累的资料并查阅大量国内外有关混凝土结构疲劳的资料和文献编写而成。

全书共10章，第1章绪论，主要通过工程实例，说明防止混凝土结构发生疲劳破坏的控制因素和疲劳设计的必要性。第2章疲劳荷载，介绍了荷载谱的编制方法及吊车，桥梁车辆，风、波浪荷载。第3章混凝土的疲劳，介绍了混凝土的单轴拉、压、压—拉疲劳和影响混凝土疲劳的因素，定侧压下混凝土的疲劳和变幅疲劳，疲劳累积损伤模型和本构关系。第4章钢筋的疲劳，介绍了普通钢筋和预应力钢筋的疲劳及变幅疲劳。第5章构件和结构的疲劳性能，介绍了构件和结构的弯曲破坏、剪切破坏、粘结破坏，构件和结构的变形和裂缝，确定结构疲劳损伤的方法，钢筋和混凝土间的联接和锚固。第6章结构和结构构件的疲劳分析，介绍了疲劳应力分析方法、应变分析方法、基于本构关系的分析方法和基于断裂力学的方法。第7章各国规范对疲劳的处理方法，介绍了各规范的应用范围、设计原则、疲劳估算、分析方法和构件中应力的计算。第8章钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件正截面疲劳承载力验算，介绍了钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件正截面的疲劳性能及基本假定，正截面疲劳强度计算和验算。第9章钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件斜截面疲劳承载力验算，介绍了重复荷载作用下钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件斜截面的受力特性，斜截面疲劳抗剪强度的计算方法。第10章钢筋混凝土受弯构件正常使用极限状态的疲劳变形和裂缝验算，介绍了受弯构件压区混凝土应变及挠度和裂缝宽度的变化规律，重复荷载作用下钢筋混凝土受弯构件刚度和挠度的计算方法，部分预应力混凝土受弯构件刚度和挠度的计算方法，受弯构件正截面和斜截面裂缝宽度的计算和验算。

本书的研究工作一直得到我的导师赵国藩院士的鼓励和指导，在此深表由衷的感谢！另外本书介绍的研究工作是在李朝阳博士、吕培印博士、赵东拂博士、杨健辉博士、朱劲松博士、曹伟博士及大连理工大学结构研究室的试验技术人员等的参与下完成的，在此对他们所做出的贡献表示衷心的感谢。同时还要感谢为

本项科研项目提供经费资助的国家自然科学基金委员会和中国建筑科学研究院。

限于作者水平，书中难免有缺点乃至错误，敬请读者批评指正。

感谢机械工业出版社和大连市政府学术专著基金对此书所给予的支持和资助。

宋玉普  
于大连理工大学  
2005年10月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
参考文献.....	10
<b>第 2 章 疲劳荷载</b> .....	15
2.1 荷载的分类.....	15
2.2 荷载谱及其编制方法.....	18
2.3 吊车荷载.....	32
2.4 铁路桥梁机车车辆荷载.....	37
2.5 公路桥梁车辆荷载.....	39
2.6 风荷载.....	43
2.7 波浪荷载.....	47
2.8 风和波浪的疲劳分析方法.....	49
参考文献.....	51
<b>第 3 章 混凝土的疲劳</b> .....	53
3.1 概述.....	53
3.2 受压状态素混凝土的疲劳特性.....	53
3.3 受拉状态素混凝土的疲劳特性.....	59
3.4 压拉反复状态下素混凝土的疲劳特性.....	66
3.5 影响混凝土疲劳性能的因素.....	73
3.6 定侧压下混凝土的疲劳.....	87
3.7 混凝土的变幅疲劳特性.....	138
3.8 疲劳累积损伤模型和本构关系.....	169
参考文献.....	187
<b>第 4 章 钢筋的疲劳特性</b> .....	191
4.1 普通钢筋的疲劳.....	191
4.2 预应力钢筋的疲劳.....	208
4.3 变幅疲劳.....	243
参考文献.....	245

<b>第 5 章 构件和结构的疲劳性能</b> .....	249
5.1 概述 .....	249
5.2 弯曲破坏 .....	250
5.3 剪切破坏 .....	250
5.4 粘结破坏 .....	254
5.5 变形和裂缝宽度 .....	257
5.6 确定结构疲劳损伤的方法 .....	259
5.7 钢筋与混凝土间的连接和锚固 .....	261
参考文献 .....	264
<b>第 6 章 结构或结构构件的疲劳分析</b> .....	266
6.1 引言 .....	266
6.2 疲劳分析 .....	266
6.3 断裂力学分析 .....	271
参考文献 .....	282
<b>第 7 章 各国规范对疲劳的处理方法</b> .....	285
7.1 引言 .....	285
7.2 应用范围 .....	285
7.3 设计原则 .....	286
7.4 疲劳估算 .....	287
7.5 分析方法 .....	287
7.6 疲劳荷载下钢筋混凝土和预应力混凝土构件中的应力计算 .....	288
参考文献 .....	292
<b>第 8 章 钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件正截面疲劳承载力验算</b> .....	293
8.1 钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件正截面疲劳性能及基本假定 .....	293
8.2 钢筋混凝土受弯构件正截面疲劳应力的计算和验算 .....	297
8.3 预应力混凝土受弯构件正截面疲劳应力的计算和验算 .....	300
8.4 疲劳可靠性验算方法 .....	306
8.5 分级验算法 .....	321
参考文献 .....	328
<b>第 9 章 钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件斜截面疲劳承载力验算</b> .....	329
9.1 钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件斜截面疲劳性能 .....	329
9.2 钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件斜截面疲劳应力的计算和验算 .....	334
9.3 计算例题 .....	346
参考文献 .....	348

---

<b>第 10 章 钢筋混凝土受弯构件正常使用极限状态的疲劳变形和裂缝验算</b> ...	350
10.1 重复荷载作用下受弯构件压区混凝土应变及挠度和裂缝宽度的变化规律 .....	350
10.2 重复荷载作用下钢筋混凝土受弯构件刚度和挠度的计算 .....	352
10.3 重复荷载作用下部分预应力混凝土受弯构件刚度和挠度的计算 .....	355
10.4 重复荷载作用下受弯构件正截面裂缝宽度的计算 .....	361
10.5 重复荷载作用下受弯构件斜截面疲劳裂缝的计算 .....	368
10.6 重复荷载作用下受弯构件斜截面疲劳抗裂的计算 .....	371
参考文献 .....	376



# 第 1 章 绪 论

许多钢筋混凝土结构,如吊车梁、公路及铁路桥梁等除了承受静载作用外,还要经常承受重复荷载的作用。结构材料在重复荷载的作用下,将会发生低于静载强度的脆性破坏,即疲劳破坏。因此,对于这类结构设计,必须考虑结构构件的疲劳强度问题。人们对混凝土结构疲劳性能的研究最早始于 19 世纪末,1898 年 Considere<sup>[1]</sup>和 De Joly<sup>[2]</sup>对水泥砂浆试件的疲劳问题进行了最早的研究;进入 20 世纪 20 年代,由于公路的发展,混凝土路面的抗折疲劳性能进一步引起了人们对混凝土疲劳性能的研究兴趣<sup>[3,4]</sup>。美国于 1947 年成立了混凝土疲劳委员会,专门研究混凝土的疲劳问题<sup>[5]</sup>。然而,直至 20 世纪 70 年代以前,由于很多承受重复荷载作用的钢筋混凝土结构都是按容许应力法设计,结构的容许应力较低,很少发现钢筋混凝土结构因疲劳而破坏的工程实例。因此对混凝土结构的疲劳问题从未象钢结构那样受到重视。但随着钢筋混凝土结构向高强、轻质方向的发展,如采用了高强混凝土和高强钢筋,又采用充分利用材料强度的设计理论,如极限状态设计理论<sup>[6]</sup>、混凝土多轴强度理论等<sup>[7]</sup>,导致结构中的许多构件处于高应力状态下工作,并使工作应力变幅越来越接近于疲劳应力幅。另外,由于混凝土结构逐渐扩大应用到许多循环次数较多,重复荷载较大的结构,如海洋结构、压力容器、轨枕等,使得混凝土结构的疲劳已成为工程设计中不可忽视的问题。

国内外针对混凝土结构的疲劳问题开展了大量的研究工作,其科研成果部分地被有关设计规范所采用。如由中国建筑科学研究院主持的“混凝土结构设计规范”第三批至第五批科研课题均将混凝土、钢筋、钢筋混凝土梁、预应力混凝土梁的疲劳性能作为重要的研究内容之一。其中,第三批规范科研课题的一些主要成果在《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—1989)<sup>[8]</sup>中被采纳。《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》(TB 10002.3—1999)<sup>[9]</sup>在疲劳承载力设计章节的编制中也采纳了第四批规范科研成果中的部分内容。国际上,美国混凝土协会(ACI)215 委员会于 1974 年发表了“承受疲劳荷载的混凝土结构设计要点”<sup>[10]</sup>,其中一些内容被美国 AASHTO 于 1977 年所颁布的《公路桥梁规范》<sup>[11]</sup>所采用。国际预应力混凝土协会(FIP)和欧洲混凝土协会(CEB)于 1990 年提出的《混凝土结构模式规范 1990》(CEB-FIP Model Code 1990)<sup>[12]</sup>也列出了承受疲劳荷载的混凝土结构设计的有关条款。1992 年颁布的全欧标准(EUROPEAN PRE STANDARD)和 1999 年的亚洲混凝土模式规范也均有关于混凝土结构疲劳的

条款。

当前混凝土结构疲劳研究的主要问题可分为如下几个方面。

从荷载方面,建立吊车梁、火车车辆、海洋平台等的荷载谱是进行可靠度分析的基础。目前这方面的工作正在进行。铁路车辆的荷载谱已进行过调查,并有了结果。

从材料方面,研究混凝土的多轴疲劳强度是一个热点。因为工程实际中,混凝土的疲劳不仅在一个方向,有时两个方向,甚至三个方向均受到疲劳作用,如核反应堆压力容器和安全壳、混凝土海洋采油平台、水电站的混凝土蜗壳等。国际上,文献[13~17]进行了双轴压及双轴拉压疲劳。国内,大连理工大学进行了系统的双轴及三轴定侧压下的疲劳试验<sup>[18~23]</sup>。另外变幅疲劳和随机变幅疲劳也是材料疲劳特性的研究热点<sup>[24]</sup>。

从分析理论方面,随着疲劳全过程分析和变幅疲劳的发展,产生了疲劳本构模型、疲劳累积损伤本构模型、概率理论和可靠度理论的应用。

### 1. 疲劳损伤变量

在疲劳荷载的作用下材料性能要发生劣化,用以表征其内部结构组织出现如裂纹形成、扩展、空洞萌生和晶格位错等微观不可逆变化造成的材料力学性能劣化的物理量称为损伤变量。

目前,定义金属材料的损伤变量已很多,如循环次数、晶格位错数、裂缝数和长度、应变、应变能、弹性模量、硬度、密度、声发射、超声波法、电阻法、磁场法、全息照相等。关于混凝土的损伤变量定义虽然没有金属材料的定义方式之多,但也不下十余种,下面就工程上常用的几种定义方式作以简单介绍。

(1) 弹性模量法 文献[25~27]根据疲劳过程中混凝土弹性模量衰减的规律和特点,用其来定义损伤变量如下:

$$D = 1 - E'/E \quad (1-1)$$

式中  $E$ ——混凝土初始弹性模量;

$E'$ ——经历一定循环次数后的弹性模量。

另外,文献[25]还认为用剪切模量等参数来定义损伤变量同样可以描述混凝土的疲劳损伤过程,并给出了相应的损伤表达式。

(2) 剩余强度法 Ravindra<sup>[28]</sup>(1996)根据混凝土纵向受压疲劳加载后,横向劈拉强度降低的特点,提出了用劈拉强度的衰减来定义损伤变量,即

$$D = 1 - \sigma_i/f_i \quad (1-2)$$

式中  $f_i$ ——混凝土试件初始无损劈拉强度;

$\sigma_i$ ——受压疲劳加载一定次数后的剩余劈拉强度。

(3) 最大疲劳应变法 文献[21](2003)根据混凝土双轴受压疲劳试验和先前单轴疲劳试验得到的最大疲劳应变呈三阶段发展的规律,认为该规律也是混凝土

土内部损伤演化的反映,并在此基础上提出了应用最大疲劳应变定义的损伤变量,即

$$D = \frac{\varepsilon_{\max}^n - \varepsilon_{\max}^0}{\varepsilon_{\max}^f - \varepsilon_{\max}^0} \quad (1-3)$$

式中  $\varepsilon_{\max}^0$ 、 $\varepsilon_{\max}^n$  和  $\varepsilon_{\max}^f$ ——混凝土纵向疲劳初始最大应变、疲劳  $n$  次后瞬时最大应变和极限最大应变。

(4) 残余疲劳应变法 文献[18,19,29~31]通过单轴和多轴疲劳实验发现,混凝土的损伤发展规律与疲劳变形发展规律是一致的,与加载历史无关,并且疲劳破坏时残余应变几乎为定值。因而据此提出了用残余应变定义的损伤变量:

$$D = \varepsilon_r^n / \varepsilon_{rf} \quad (1-4)$$

式中  $\varepsilon_r^n$ 、 $\varepsilon_{rf}$ ——疲劳  $n$  次后的残余应变和破坏时的极限残余应变。

(5) 耗散能量法 Mirosław<sup>[32]</sup>(1993)依据能量守恒原理,认为混凝土的疲劳破坏就是能量释放的过程,在此基础上提出了用耗散能量来定义的损伤变量:

$$D = E/E_{\text{tot}} \quad (1-5)$$

式中  $E_{\text{tot}}$ ——单位体积混凝土总的耗散能量;

$E$ ——疲劳加载一定次数后耗散的能量。

(6) 超声波速法 文献[33,34]的试验结果表明混凝土的超声波速与其强度、弹性模量和内部微裂纹密度等密切相关,因此超声波速的变化规律也能较好地反映混凝土各参数的劣化程度,由此定义的损伤变量为:

$$D = 1 - \frac{\hat{v}_{Tn}^2}{v_T^2} \quad (1-6)$$

式中  $\hat{v}_{Tn}$ 、 $v_T$ ——疲劳  $n$  次后混凝土的横向超声波速和初始无损时的横向超声波速。

(7) 声发射累计数法 声发射是材料或结构受外力或内力作用产生变形、裂纹开裂或扩展过程中伴随的以弹性波形式释放应变能的现象。声发射的发展趋势反映了混凝土内部破坏的微观过程,由此可以反演出混凝土的断裂和脆性等特征。混凝土的疲劳试验还表明<sup>[35,36]</sup>:声发射累计数随循环次数的增加而逐步增大,在疲劳破坏前急剧变化;疲劳寿命越长其累计数越大。因而可用此定义损伤变量来描述混凝土的疲劳损伤过程。

综上所述,目前关于混凝土疲劳损伤变量的定义还没有一个明确的参量和办法,但从以上常用几种定义方式的结果看,都能在不同程度上反映出混凝土疲劳损伤的非线性过程和规律。因此,对于混凝土疲劳损伤变量的定义,只要能符合损伤力学的概念、能较好地反映混凝土内在疲劳损伤机理和程度、便于工程应用就可以采用,至于具体应用哪一个物理量并不是关键。

## 2. 疲劳累积损伤模型和剩余疲劳寿命预测

疲劳累积损伤模型和剩余疲劳寿命预测也是目前研究的热点。建立混凝土疲劳累积损伤模型进行剩余寿命预测的目的是为现役混凝土结构剩余寿命评估和有损结构维修加固提供参考和依据。随着人类社会的发展,近年来交通运输量有了显著的增长,尤其在我国,今后的交通运输量将会成倍地增长。那么现有结构物按原设计年限内的设计功能能否满足今后的使用要求,就与结构的累积损伤紧密地联系起来。这对充分利用现有结构物的潜力,并保证安全可靠是很必要的,它是一项具有明显经济效益的工作。最早在工程中得到广泛应用的疲劳累积损伤理论是1945年M. A. Miner提出的线性累积损伤理论,即Miner准则<sup>[37]</sup>。由于该准则形式简单,使用方便,因此早期被人们所普遍地接受。但后来随着对混凝土疲劳问题研究的深入,人们通过各种形式的变幅疲劳试验分析<sup>[18-21,29,38,39]</sup>发现Miner准则在描述混凝土累积损伤时并不完全适用,对不同的加载顺序其结果不同。在从低幅向高幅加载变化时 $D > 1$ ,而在从高幅向低幅变化时 $D < 1$ ,按其估算的疲劳寿命与实际情况有较大的出入。因此一些学者在试验的基础上提出了对Miner线性累积损伤准则进行修正的模型或基于损伤演变规律建立了非线性累积损伤模型,例如指数型累积损伤模型<sup>[40]</sup>、双曲线型累积损伤模型<sup>[41]</sup>、三次多项式型累积损伤模型<sup>[42]</sup>、修正线性累积损伤模型<sup>[43]</sup>和变形演变决定法模型<sup>[44]</sup>等。然而,由于修正线性累积损伤模型在预测疲劳寿命时产生分岔现象<sup>[45]</sup>,而大多数非线性累积损伤所建立的热力学依据不足或试验数据不完备而不能客观地反映疲劳损伤的一般规律,因此疲劳剩余寿命预测的精度往往并不是很理想,文献<sup>[46]</sup>解决了这一问题。

### 3. 混凝土疲劳本构模型

关于混凝土疲劳本构模型研究目前也很活跃。根据有限的资料,按其建立所采用的理论和方法可将这方面的研究分为以下几类:

(1) 曲线适度法和其他数值方法模拟的疲劳本构模型 文献<sup>[47~51]</sup>根据混凝土疲劳应力—应变曲线的特点,在曲线上确定几个控制点,然后通过插值或其他数学函数拟合得到疲劳本构模型。这类模型的特点是抛开了经典塑性理论或损伤理论的概念,不考虑材料本身物理性能的劣化,属于纯粹的数学模型。因此该类模型一般只适用于单轴低周反复加载,具有一定的局限性。

(2) 基于断裂理论的疲劳本构模型 文献<sup>[52]</sup>根据固体材料在断裂过程中的刚度衰减,用断裂能来模拟循环加载过程中混凝土断裂区材料裂缝闭合和开裂的过程。由于该类模型一般都做了线性或分段线性简化,因此应用比较方便,但只适用于单轴受拉疲劳情况。

(3) 基于损伤理论的疲劳本构模型 这类模型主要是以含内变量的不可逆热力学理论为基础,在疲劳过程中内变量被考虑成能宏观表征材料内部组织状态不可逆变化的某种内部变量(用损伤变量来表示),而不可逆的能量耗散则表现

为克服内部变量变化的广义热力上。这方面比较典型的模型有 Papa<sup>[53]</sup> (1993) 和 Mazars<sup>[54]</sup> (1990) 各向同性损伤模型、Papa<sup>[53]</sup> (1993) 各向异性损伤模型、Ozbolt<sup>[56]</sup> (1992) 基于损伤理论建立的微平面模型以及 Chen<sup>[57]</sup> (1985) 和 Ouyang<sup>[58]</sup> (1990) 应用边界面的概念建立的损伤模型等。这类模型考虑了内部组织结构变化对宏观本构关系的影响, 将宏观表象与微观机制结合起来, 在理论上推导比较严密和完备, 但也往往不能考虑加载/卸载的滞回现象和加载速率的影响, 有时形式又过于抽象, 不便于工程应用。

(4) 基于塑性理论的疲劳本构模型 这类模型主要是基于塑性理论, 应用边界面的概念构建的, 文献[59—62]进行了这方面的研究。与经典塑性理论相比抛开了屈服面的概念, 加载过程中不用判断每次应力点是否在当前加载面上还是内部, 只是通过当前点到边界面的“距离”来判断该点的应力状态, 因此对单轴疲劳加载和复杂疲劳加载都能进行描述。但由于不同模型所采用的边界面函数不同, 因而对混凝土循环加载/卸载曲线的模拟精度也往往不同; 另一方面, 由于抛开了屈服面, 有的模型不能完全描述混凝土的本构特征, 如文献[59]就不能描述混凝土应变软化现象。

(5) 基于塑性/损伤理论相结合的疲劳本构模型 这类模型主要是基于混凝土具有塑性和损伤相结合的复杂性质, 在应力空间将应力分解为拉应力和压应力两部分, 应用损伤理论来描述拉应力引起的损伤变化; 用塑性理论来描述压应力引起的塑性流动。这方面很具有代表性的模型是 Taher<sup>[63]</sup> (1993) 应用边界面的概念和优点建立的塑性/损伤模型与 Hansen<sup>[64]</sup> (2001) 应用经典塑性和损伤理论建立各向异性塑性/损伤模型。由于该类模型较全面地考虑了混凝土的性质, 因此对混凝土复杂单调加载以及低周反复加载/卸载性能都进行了较好的描述。但因为没有考虑高周疲劳加载下混凝土的损伤累积和塑性演变规律, 因此该类模型对混凝土高周疲劳本构关系并不适用。

#### 4. 概率理论和可靠度理论在混凝土疲劳问题中的应用研究

由于混凝土的疲劳破坏机理要比静力承载能力的破坏机理复杂, 并且影响因素很多, 即使在相同的试验条件下, 相同的试件在相同的确定性荷载历程作用下, 疲劳寿命也存在着很大的离散性。因此, 在实际应用中用结构材料的物理量来定量的分析疲劳寿命存在着一定的困难。在这种情况下运用概率理论对混凝土疲劳寿命与可靠性进行宏观分析和估计就显示出逻辑上、理论上和实质上的必要性和合理性。国内外许多学者在这方面进行了研究, 并取得了一定的成果。

McCall<sup>[65]</sup> (1958) 最早通过混凝土梁试件 (75mm × 75mm × 368mm) 受弯疲劳试验对疲劳破坏概率进行了分析, 发现在 0 ~ 2000 万次疲劳加载范围内混凝土并无疲劳极限, 并针对疲劳强度提出了相应的概率模型。

Byung<sup>[66]</sup> (1991) 进行了混凝土梁试件 (100mm × 100mm × 500mm) 的受弯变幅

疲劳试验,应用两参数威布尔概率分析,通过图法、矩法和极大似然法对分布参数进行了估计,发现在不同应力水平下其疲劳寿命分布参数并不相同。文献[67]也得到了相似的结论。

Yang<sup>[68]</sup>(1994)基于混凝土疲劳损伤理论提出了疲劳寿命预测的概率方法,并采用马尔可夫链方法对疲劳损伤过程进行了模拟,从而给出了在确定的疲劳次数下和疲劳破坏下的损伤状态密度分布函数。

李靖华<sup>[69]</sup>(1997)基于混凝土疲劳寿命既服从对数正态分布又服从两参数威布尔分布,由概率特征函数出发研究了两种分布的逼近性,得到了两参数威布尔分布的估计方法,从而进一步验证了疲劳寿命标准差与应力水平呈线性关系的结论。董聪<sup>[70]</sup>(1996)也根据对数正态分布和威布尔分布之间存在解析关系得出当显著性水平 $\alpha=0.01$ 、 $0.05$ 、 $0.10$ 和 $0.25$ 时用威布尔分布来拟合正态分布是可行的这一结论。

伍石生<sup>[71]</sup>(2002)利用数理统计方法对混凝土疲劳试验中非破坏性数据(对应于给定最大疲劳次数,如200万次还未破坏的数据)的位置进行了估计,认为分析时将其简单的剔除是不合理的,并在此基础上给出了处理疲劳试验中含非破坏性数据的方法。文献[72](2002)从混凝土疲劳试验的经济性和合理性出发,利用概率方法对已有各种疲劳试验数据进行统计分析,得到若使疲劳试验结果相对误差不超过50%时,试验样本容量不能小于5个,并建议相关试验规程和规范中混凝土疲劳试验样本容量取5个。这些研究成果对混凝土疲劳试验具有指导性意义。

近年来,随着可靠度理论的进一步完善和模糊理论、灰色预测理论的发展,国内外一些学者开始将随机可靠度理论、模糊可靠度理论和灰色预测理论应用到实际混凝土结构的疲劳失效问题中<sup>[73~77]</sup>,为现役混凝土结构的可靠性评估和维修决策提供了有价值的参考。

从结构疲劳可靠性研究和设计领域来说,以机械工程结构发展较快。目前在飞机、汽车、运输机械和农业机械等方面已较广泛地采用以疲劳可靠性基础的设计验算方法。在土木工程方面,国际上以公路和铁路桥梁进展较快,许多国家在编制公路和铁路桥梁设计规范时引进了结构疲劳可靠性的概念,包括荷载谱、应力谱、疲劳极限状态、使用寿命和疲劳可靠度等。

英国标准局于1967年开始组织和编写以分项系数和极限状态设计原理为基础的新的桥梁规范。在编制过程中,正值工程结构可靠性理论在国际上发展较快的时期,因此,逐渐引入了结构可靠性的概念。在大量研究和试设计工作基础上,于1980年提出了《BS 5400 钢桥、混凝土和组合桥》的第10篇“疲劳设计实用规则”。在这一新的疲劳设计规则中采用荷载谱和应力谱代替等幅重复荷载和等幅重复应力,并采用应力变程代替应力比 $\rho$ 。

美国混凝土协会(ACI)215委员会于1974年发表了《承受疲劳荷载的混凝土结构设计要点》<sup>[10]</sup>,其中一些主要内容已被美国AASHTO1974年和1977年所颁布的公路桥梁规范所采用。在这些规范中,混凝土和钢筋的容许应力仍是以等幅重复应力为基础,但在确定钢筋容许应力时,采用了应力变程代替过去的应力比 $\rho$ 。

为了使混凝土结构的设计和真实荷载情况相适应,近年来,一些国家开始进行混凝土结构在变幅重复荷载作用下疲劳承载能力和设计方法的研究,其中包括公路和铁路混凝土桥的应力谱的制定<sup>[78,79]</sup>以及混凝土和钢筋在变幅重复应力下疲劳特性的试验研究等。但由于混凝土结构在变幅重复荷载下的疲劳设计问题十分复杂,直至最近才由国际预应力混凝土协会(FIP)和欧洲混凝土协会(CEB)于1990年提出的《混凝土结构模式规范》(CEB-FIP Model Code)<sup>[12]</sup>的第六章中列入混凝土结构按变幅重复荷载设计的有关条款。1981年铁道部下达了《铁道建筑安全度(可靠度)及设计原理》的科研项目。铁道部科学研究院、上海铁道学院、北方交通大学、长沙铁道学院、华东交通大学等单位曾先后对我国一些铁路桥梁进行了荷载谱和应力谱的测定,并对疲劳可靠度进行了估算。

1985年国家计委下达了《铁路工程结构可靠度设计统一标准》的编制任务,其中一个重要内容就是铁路钢结构和混凝土结构的疲劳可靠度设计原理和方法。1985年铁道部还决定开展以可靠性理论为基础的铁路设计规范的改革,其中钢桥和混凝土桥的疲劳可靠性验算列为部重点科研项目。

1987年,《基于可靠性的混凝土受弯构件疲劳验算方法的研究》列为《混凝土结构设计规范》第四批科研课题之一,并已发表多篇论文<sup>[80]</sup>。

另外,钢筋混凝土结构的疲劳验算目前还存在某些不足和设计考虑不周的地方,从而引起结构的疲劳破坏,如混凝土结构设计规范关于混凝土结构的疲劳验算仅考虑了疲劳承载能力,而没有考虑疲劳状态对结构的裂缝和挠度的限制及结构的耐久性等因素对疲劳的影响。这对全预应力混凝土结构的影响不大,但随着部分预应力混凝土的出现,在活载作用下允许带裂缝工作,因此当极限抗弯能力相同时,钢筋中的应力较高,可能发生疲劳破坏,因此对承受重复荷载作用的部分预应力混凝土梁,必须研究由于重复荷载对使用性能及终极强度带来的影响。实际发生疲劳破坏的钢筋混凝土结构是多种因素的综合。在很多情况下,是很难把它们单独分开的。如纽约的Throgs Neck桥<sup>[81]</sup>,1961年建成通车,而在20世纪70年代初,混凝土桥面板就出现了明显的裂缝,其主要原因是由于桥面板下的悬臂板梁的反复挠曲变形在混凝土桥面板上引起二次拉应力和疲劳应力。其他的原因如撒除冰盐,导致钢筋锈蚀;桥面板的保护层厚度由于磨损而减少,分布钢筋偏少。另外,构造处理也十分重要,特别在连接部位和接缝处,如德国的某桥梁在正常检查时,发现曲线的混凝土上部结构在4处接缝处产生了2mm宽的

裂缝<sup>[82]</sup>。在每一种情况下,均发现连接套筒附近,梁腹板底部的5根预应力钢筋束已断裂。在某些接缝处将混凝土凿掉,露出连接套筒,发现钢筋在有轧痕的区域已脆断失效。经计算发现,静、活荷载引起的预应力筋的应力在混凝土未裂和开裂处分别为16MPa和198MPa,而连接处钢筋束在2百万次循环的疲劳强度为70MPa。由这些数据可见,预应力钢筋的断裂是由于连接部位混凝土开裂,导致预应力钢筋应力增大,而产生疲劳破坏。再如瑞典的一些桥,虽然接缝处设计为防水、防氯化物侵入,特别应用聚氯丁橡胶止水等措施,但由于在接缝处连接构件的混凝土浇筑质量很难保证,有些桥梁运行3~10年就出现了裂缝及混凝土剥离现象,而连接部位出现裂缝后,导致氯化物进入混凝土内部,加速了钢筋的腐蚀,这样在反复的交通活荷载作用下,最终导致结构丧失了承载力。瑞典的某支撑移动吊车轨道梁的柱头由于构造钢筋不足,在吊车反复荷载作用下,导致混凝土开裂、剥落,固定吊车梁的螺栓被剪断。

超载是引起结构疲劳破坏的重要原因,往往由于一次超载引起裂缝,而在反复荷载作用下,裂缝扩展,导致疲劳破坏,如在瑞典北部的Vasterbotten桥<sup>[83]</sup>,设计允许的活荷载为514kN,而通过了2200kN的活荷载,加之抗剪腹筋按20世纪60年代以前的规范设计,用量偏低,导致梁中出现竖直和斜向裂缝,虽经修补,但裂缝又重新张开。

瑞典的Ashammar铁路上的高架桥上混凝土连续桥面板也是由于运输木材的卡车超载导致板底面出现横向裂缝,混凝土保护层剥落,经修补后,损伤又重新出现。主要由于出现裂缝后,碳化作用增强,导致内部钢筋腐蚀,在反复荷载作用下,裂缝又重新发生。

设计不合理导致疲劳破坏的例子也很多,如英国某工厂的楼板底层为厚51mm的预应力预制板,每块板的宽度为510mm,跨度3.048m<sup>[84]</sup>。楼板顶面为现场浇筑的混凝土,厚89mm,并配有纵横向钢筋。楼板上上面有叉车运行。经过一段运行时间后,沿预应力预制底板间的接缝处发现楼板顶面出现裂缝,其主要原因是原设计假设楼板为整体,车轮的集中荷载可以分布在3个预应力预制底板上,即每块预制板能将该板上的荷载传给两边邻近的预制板上。但由于叉车反复地作用,使预制板间产生裂缝,每块预制板范围的楼板成为了分离于两边预制板的独立板,其上的集中荷载不能传递给邻近的板,所以受力增大,导致裂缝和挠度进一步增大,最后失去承载能力。

基础底板受机械的反复作用也易产生疲劳破坏,如瑞典的某混凝土基础由于切纸机每分钟100次的反复作用而引起疲劳破坏<sup>[85]</sup>。该混凝土基础厚1m,长2.5m,1970年建成,1976年出现裂缝,相当于受到 $70 \times 10^6$ 次循环作用。打桩也会引起疲劳破坏,如某工程6%的桩在打桩时出现横向和顺筋裂缝。

从上面的例子可以看出,防止混凝土结构发生疲劳破坏,主要应从如下几方



面进行控制:

在反复荷载作用下,反复的挠曲变形引起次应力,设计中应考虑这种次应力引起的二次效应。

在结构运行期间,一定要避免超载运行和超过设计频率的运行,特别是不允许超载运行;因为超载会导致混凝土开裂,而在反复荷载作用下,混凝土一旦开裂,裂缝不仅不会闭合,反而会逐渐扩展,最终导致结构中钢筋锈蚀,结构破坏。随着经济的迅速发展,很多桥梁结构会出现超设计频率运行问题,对此,管理部门应加强管理,并记录超过设计频率的数量,提前安排检修,避免目前有时出现的桥梁结构混凝土已开裂、混凝土保护层已剥落,甚至钢筋已锈蚀,而管理部门尚不知道。因为超频率运行,可能在结构运行至设计基准期之前就会出现需要大修的部位。

在结构设计中,是否需要考虑疲劳荷载影响主要依据荷载的频率和应力水平,如果活荷载引起的应力水平远大于静荷载引起的应力水平,且频率较高,就一定要进行疲劳验算。目前在结构设计中,往往重视主体结构,轻视结构构件。如在公路桥梁设计规范中,目前尚无疲劳验算的要求,这是因为公路桥梁一般活荷载引起的应力水平与静力荷载引起的应力水平相比较小。但这是对主体结构而言,而对于桥面板,情况就相反了,活荷载引起的应力远大于静力荷载引起的应力,所以也应进行疲劳验算。再如工业厂房的楼面板设计有时也应考虑疲劳影响。所以设计中绝对不能仅依据某规范没有疲劳验算的要求就一律不考虑疲劳影响,而应按反复荷载的大小和频率来分析是否需要进行疲劳验算。

为了防止结构发生疲劳破坏,应注意控制混凝土材料的选择、混凝土碳化、化学侵蚀等耐久性方面的问题。还要控制裂缝、挠度等正常使用要求。

在构造方面,为了防止结构发生疲劳破坏,各构件间的连接应尽量满足计算简图要求的形式,如铰接、嵌固端等;桥面铺砌层的接缝应合理设计;对受冲击、振动的结构构件应采取专门的构造措施进行缓冲和减振。反复荷载作用点应采取专门的构造措施。

对于预应力混凝土结构,关键要注意灌浆管的布置、接头处理和灌浆密实,防止外部湿气进入,导致钢筋锈蚀;防止锚固区等局部应力集中部位出现裂缝;钢筋的连接要保证质量,优先采用机械连接。

钢筋混凝土结构的疲劳性能与构件的材料(混凝土和钢筋)性能和它们之间的联结密切相关。对于受弯状态的低配筋构件的破坏,疲劳特性直接与钢筋的性能有关。对于高配筋结构和剪切及粘结为控制因素的结构,条件要复杂得多。在使用条件下,结构中混凝土有不同的应力水平,而疲劳与应力水平有关,所以,整个结构随着应力水平的变化,对疲劳的敏感性也是变化的,应力水平越高,疲劳破坏的可能性越大。由于疲劳,混凝土的裂缝将扩展,并导致过大的变形和应