



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

# 混凝土疲劳本构关系和结构随机疲劳 响应分析

(国家自然科学基金重点项目 编号: U1134209)

(国家自然科学基金重大研究计划资助项目 编号: 91315301)

姓 名: 丁兆东

学 号: 0910020067

所在院系: 建筑工程系

学科门类: 工学

学科专业: 结构工程

指导教师: 李杰 教授

二〇一五年五月



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Doctor of Philosophy

# **The Fatigue Constitutive Relation of Concrete and Stochastic Fatigue Response of Concrete Structure**

(Funded by National Natural Science Foundation of China,  
Grant No. U1134209, by the Major Research Plan of the National  
Natural Science Foundation of China, Grant No. 91315301)

Candidate: Ding Zhaodong  
Student Number: 0910020067  
School/Department: Civil Engineering  
Discipline: Civil Engineering  
Major: Structural Engineering  
Supervisor: Prof. Li Jie

May, 2015

## 摘 要

结构在其服役期内往往受到疲劳荷载的作用,混凝土材料作为运用最广泛的建筑材料,其疲劳性能值得高度关注。由于混凝土材料本身组分的复杂性及由其导致的力学性能的非线性和随机性,使得混凝土疲劳问题研究也极具挑战性。本文从对混凝土疲劳的物理机制研究入手,考察了其疲劳损伤演化规律,建立了混凝土随机损伤疲劳本构关系模型,并在此基础上研究了混凝土疲劳寿命概率分布和结构疲劳寿命分析的加速计算方法,进而结合工程实际,探索了评估混凝土结构疲劳可靠度的新理论框架。

为获得具有物理机制的混凝土疲劳损伤演化模型,从混凝土材料在纳米层级的裂纹扩展出发,结合速率过程理论得到了疲劳裂纹扩展速度。通过引入疲劳扰动效应和水分子的动力作用,修正了裂纹表面能表达式,从而很好地解释了疲劳效应的细观物理。结合随机细观断裂模型,在损伤力学框架下建立了混凝土的疲劳损伤演化公式,由此,形成了混凝土随机损伤疲劳本构模型。通过引入重整化群理论,解释了疲劳耗能和脆性断裂之间的转化机理,说明了疲劳过程能量耗散来自于最低层次微裂纹的亚稳态扩展,而脆性断裂则是在临界点附近发生的动态失稳。利用所建立的疲劳本构模型计算了混凝土的疲劳寿命和损伤演化,与试验结果的对比显示本文建议模型与算法可以很好地把握混凝土的疲劳性能。

根据物理随机系统的基本观点,识别、确立了混凝土随机损伤疲劳本构模型的基本随机参数。通过收集的一批混凝土单轴受拉和受压疲劳试验数据,识别并统计给出了基本随机参数的概率分布。结合概率密度演化理论获得了混凝土疲劳寿命的概率分布,从而为基于概率的疲劳寿命估计打下了基础。

针对混凝土结构疲劳全过程有限元分析耗时太长的缺陷,发展了两种加速算法---基于预测-外推的加速算法和时间双尺度分解算法。将这两类算法与本文建立的疲劳本构模型结合,通过对有限元软件 ABAQUS 的二次开发,实现了基于有限元分析的混凝土结构疲劳响应的加速求解。结果显示在设置一定控制误差策略的情况下,计算结果能够很好地逼近试验结果以及循环过程逐步模拟方式的结果。

最后将这一系列研究结合起来,选取预应力混凝土铁路梁这一工程实际结构,进行了结构疲劳可靠度分析方法研究。通过设定受压区混凝土损伤破坏阈值,引入吸收边界条件与概率密度演化理论,计算了预应力混凝土梁的疲劳可靠度,从而初步建立了混凝土疲劳问题的可靠度分析框架。

**关键词:** 混凝土, 疲劳, 损伤本构, 随机性, 加速算法, 可靠度

## ABSTRACT

The fatigue problem in the service life of structures is frequently encountered. As the most used structure material, the fatigue character of concrete is worthy in-depth study. Because of the complexity of concrete microstructure and the corresponding nonlinearity and randomness in the mechanical behavior, the research on fatigue of concrete is very challenge. Start from studying the mechanism of concrete fatigue, this paper has investigated the fatigue damage evolution, based on which the stochastic constitutive relation of concrete fatigue is established. Further, the fatigue life distribution and the acceleration computing methods for fatigue life analysis of concrete structure are studied. Based on these, a new frame of reliability evaluation is developed with a actual engineering model.

In order to build a fatigue damage evolution model with clear physical mechanism, a physical study of propagation of nanoscale micro-cracks is performed. The propagation rate is given based on the rate process theory. Through introducing fatigue disturbance effect and the dynamics of water molecules, the propagation rate is modified to incorporate with fatigue problem. Further, the macroscale damage evolution expression is built with meso-stochastic fracture model under the frame of continuum damage mechanics. After introduction of renormalization group theory, the transition mechanism between fatigue dissipation and brittle fracture is well explained that the fatigue dissipation comes from the metastable propagation of microcracks and the brittle fracture is a result of dynamic instability occurred at the critical point. The comparison of fatigue life and damage evolution with experiments results shows that the model built here is capable of simulating the fatigue behavior of concrete.

From the basic viewpoint of physical stochastic system, the basic random variables in stochastic fatigue damage constitutive model of concrete are selected based on sensitivity analysis. The probability distributions of basic random variables are identified based on the identification and statistical analysis of related experiments on fatigue life. Combing with the probability density evolution method(PDEM), the life probability distribution of concrete is acquired and it can be used for further study on the fatigue reliability evaluation.

Considering it is too time consuming to perform FEA simulation when

cooperating the fatigue constitutive model with actual structures, two type of acceleration computing methods is developed, thus the method based on prediction and extrapolation and the method based on temporal scale separation. With combing the two methods with the fatigue constitutive model developed in the paper, the accelerating computing process is performed in FEA software ABAQUS where secondary development with the software interface is required. The simulated results show the accelerating computing results are well agreed with step by step simulation and the experiment results.

Using the fatigue constitutive model and the acceleration computing method developed above, the FEA model of a prestressed concrete beam with actual engineering background is built to explore the new analysis method of structure fatigue reliability. After setting damage thresholds of concrete in compression zone, the fatigue reliability is computed through PDEM with absorbing boundary condition. From the procedure, the preliminary frame of concrete fatigue reliability evaluation is established.

**Key Words:** concrete, fatigue, damage constitutive relation, randomness acceleration computation methods, reliability

## 目 录

第 1 章 绪论.....	错误!未定义书签。
1.1 引言.....	错误!未定义书签。
1.2 混凝土材料及其疲劳问题概述.....	错误!未定义书签。
1.3 混凝土疲劳主要研究方法评述.....	错误!未定义书签。
1.3.1 基于试验结果的经验建模研究.....	错误!未定义书签。
1.3.2 基于断裂力学的疲劳裂纹研究.....	错误!未定义书签。
1.3.3 基于损伤力学的疲劳性能退化研究.....	错误!未定义书签。
1.3.4 疲劳裂纹扩展过程的微-细观力学过程 ....	错误!未定义书签。
1.4 疲劳计算中的加速方法.....	错误!未定义书签。
1.5 混凝土疲劳随机性研究.....	错误!未定义书签。
1.6 本论文的主要思路和内容.....	错误!未定义书签。
第 2 章 基于微-细观机理的混凝土疲劳损伤本构关系研究.....	错误!未定义书签。
2.1 引言.....	错误!未定义书签。
2.2 混凝土宏观疲劳损伤理论.....	错误!未定义书签。
2.2.1 损伤的概念和有效应力.....	错误!未定义书签。
2.2.2 基于不可逆热力学框架的混凝土连续损伤力学框架.....	错误!未定义书签。
2.2.3 基于势函数的塑性和损伤演化方程.....	错误!未定义书签。
2.3 基于微细观力学机理的混凝土疲劳损伤演化.....	错误!未定义书签。
2.3.1 随机细观断裂模型.....	错误!未定义书签。
2.3.2 微观疲劳裂纹扩展能量分析.....	错误!未定义书签。
2.3.3 疲劳过程能量耗散和微裂纹群的演化.....	错误!未定义书签。
2.3.4 细观随机断裂模型中疲劳塑性的演化.....	错误!未定义书签。
2.3.5 疲劳本构的数值算法与流程.....	错误!未定义书签。
2.4 混凝土疲劳损伤模型的验证.....	错误!未定义书签。
2.4.1 基本模型.....	错误!未定义书签。
2.4.2 模型验证.....	错误!未定义书签。
2.5 本章小结.....	错误!未定义书签。
第 3 章 混凝土随机损伤疲劳本构模型参数识别与疲劳寿命分布.....	错误!未定义书签。
3.1 引言.....	错误!未定义书签。

3.2	混凝土疲劳本构模型参数灵敏度分析.....	错误!未定义书签。
3.3	基本随机参数概率分布的识别.....	错误!未定义书签。
3.3.1	基于混凝土疲劳寿命试验数据的参数识别.....	错误!未定义书签。
3.3.2	随机参数分布的理论建模和检验.....	错误!未定义书签。
3.4	混凝土疲劳寿命的概率分布.....	错误!未定义书签。
3.4.1	广义概率密度演化方程.....	错误!未定义书签。
3.4.2	广义概率密度演化方程的数值求解.....	错误!未定义书签。
3.4.3	混凝土疲劳寿命 $S-N$ 曲线的概率密度求解.....	错误!未定义书签。
3.5	本章小结.....	错误!未定义书签。
第 4 章	混凝土结构疲劳过程模拟的加速算法研究.....	错误!未定义书签。
4.1	引言.....	错误!未定义书签。
4.2	基于预测-外推的疲劳加速算法.....	错误!未定义书签。
4.2.1	算法的建模.....	错误!未定义书签。
4.2.2	算例验证与分析.....	错误!未定义书签。
4.3	基于时间尺度分解的疲劳加速算法.....	错误!未定义书签。
4.3.1	基于摄动理论的时域双尺度分解方法.....	错误!未定义书签。
4.3.2	两尺度方程组的求解.....	错误!未定义书签。
4.3.3	算例验证与分析.....	错误!未定义书签。
4.4	两类算法的简要比较.....	错误!未定义书签。
4.5	本章小结.....	错误!未定义书签。
第 5 章	混凝土结构疲劳可靠性分析.....	错误!未定义书签。
5.1	引言.....	错误!未定义书签。
5.2	基于概率密度演化理论求取可靠度的方法.....	错误!未定义书签。
5.2.1	基于吸收边界条件的可靠度评估.....	错误!未定义书签。
5.2.2	基于极值分布的可靠度评估.....	错误!未定义书签。
5.3	基于疲劳损伤演化的混凝土构件可靠度分析.....	错误!未定义书签。
5.3.1	模型的选取.....	错误!未定义书签。
5.3.2	计算模型的建模.....	错误!未定义书签。
5.3.3	计算结果分析.....	错误!未定义书签。
5.4	本章小结.....	错误!未定义书签。
第 6 章	结论和展望.....	错误!未定义书签。
6.1	主要的内容和结论.....	错误!未定义书签。
6.2	展望.....	错误!未定义书签。
附录 A	速率过程理论简介.....	错误!未定义书签。

附录 B 文献中混凝土试件疲劳寿命试验数据 .....	错误!未定义书签。
参考文献.....	错误!未定义书签。
致谢.....	错误!未定义书签。
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	错误!未定义书签。



