



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

混凝土动力损伤机理与随机动力损伤本  
构模型研究

(国家自然科学基金重点支持项目(90715033)支持)

姓名: 黄桥平

学号: 0710020093

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

二〇一一年七月



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

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

**Dynamic Damage Mechanism and Stochastic  
Dynamic Damage Constitutive Model for  
Concrete**

(Supported by the Natural Science Foundation of China for major Project  
Grant No. 90715033)

Candidate: Qiaoping Huang  
Student Number: 0710020093  
School/Department: Department of Building  
Engineering  
Discipline: Engineering  
Major: Structural Engineering  
Supervisor: Prof. Jie Li

**July, 2011**

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 摘要

在服役期内，混凝土结构往往会承受动力及冲击荷载，在动力或冲击荷载作用时，混凝土会表现出明显的应变率效应。因此，在结构非线性分析中，不仅要考虑结构的整体动力效应，同时还需考虑加载速率对混凝土本构关系的影响。建立合理的混凝土本构关系必须基于一定的物理机制。在对混凝土细观结构分析的基础上，本文将混凝土应变率效应的物理机制归结为低应变率时的黏性效应和高应变率时的惯性效应及裂纹动力扩展效应三种基本机制。

低应变率时，混凝土应变率效应主要表现为黏性效应。在连续介质损伤理论的框架内，本文首先给出了通过细观随机断裂模型建立混凝土静力损伤理论的一般原则和方法。在此基础上，通过类比 Perzyna 黏塑性规则化的方法，对细观随机断裂模型的断裂应变进行黏性规则化，得到了反映混凝土细观随机断裂的随机动力损伤本构模型。然后，利用能量等效应变的概念，将建议的动力损伤本构模型推广为多维随机动力损伤本构模型。作为建议的本构模型的实际应用，本文详细地介绍了本构模型的数值算法，完整地给出了建议本构模型的数值求解步骤。最后，作为对本构模型有效性的验证，对典型动力加载试验进行了数值的模拟，验证了模型的有效性。

在宏观黏性动力损伤本构模型的基础上，通过对混凝土细观微缺陷的考察，利用 Stefan 效应解释了混凝土低应变率时损伤黏性的细观物理本质。并在此基础上，采用拉普拉斯变换方法建立了基于 Stefan 效应的混凝土黏性随机动力损伤本构模型。结合本研究梯队完成的混凝土动力本构试验，利用建议的黏性随机动力损伤本构模型详细地模拟了混凝土单轴受压动力试验，并取得了较好的分析结果。

对于高应变率加载，采用断裂动力学方法研究了混凝土应变率效应，阐明了冲击荷载时混凝土中多重裂纹同时扩展的物理机理，分析了混凝土在高应变率时之所以产生应变率效应的物理机制。在此基础上，通过修正 Griffith 静力断裂理论，提出了基于多重裂纹同时扩展物理机制的动力断裂损伤本构模型。

在上述研究的基础上，提出了分配函数的概念，用以表示不同物理机制对混凝土动力损伤的影响，从而建立了包含不同物理机制的混凝土随机动力损伤

本构模型。

由于经典局部本构模型并没有反映材料内在细观尺度，当材料进入软化阶段时将会出现数值计算困难。为此，作为对建立软化材料本构关系的进一步探讨，本文引进了非局部本构关系的思想，并初步将前面建立的动力损伤本构模型推广为非局部隐式梯度损伤本构模型。

**关键词：**混凝土，应变率效应，本构模型，动力损伤，随机性

## ABSTRACT

During their service time period of concrete structures, concrete may be subjected to dynamic impact loading. The mechanical behavior of concrete is observed to be strain rate sensitive under dynamic loading. Thus, in the nonlinear dynamic analysis of concrete structures, not only the dynamic response of structure, but also the strain rate effect should be taken into account to reflect the effect of loading rate on the nonlinear behaviour of concrete constitutive model. Obviously, the establishing of sound constitutive model of concrete should be based on physical mechanism. With this principle in mind, we studied the micro-structure of concrete first, and found that the basic physical mechanism of strain rate effect can be classified into three physical mechanisms. That is, viscosity in lower strain rate, inertial effect and dynamic crack propagation effect in high strain rate. Based on this conclusion, nonlinear dynamic damage constitutive model is proposed to reflect the strain rate effect of concrete.

Under low loading rate, strain rate effect is mainly due to the material viscosity. In the framework of continuum damage mechanics, the general principle and method of establishing constitutive model through the microscopic stochastic rupture model (MSRM) is presented. Based on this, a viscous regularization that is analogous to the viscoplastic regularization of the Perzyna type of the rate-independent damage evolution is employed to establish the dynamic damage constitutive model. The concept of Energy Equivalent Strain (EES) is employed to extend the uniaxial dynamic viscous damage model into three-dimensional constitutive model. For purpose of application of the proposed model, the numerical algorithm of the model is presented in details, and the whole step of numerical implementation is introduced. A series of numerical simulations are performed to simulate the dynamic test. It is found that numerical simulations agree well with test results, and the validity of the model is verified.

Based on the study of the micro-structure of concrete, it is found that the

physical mechanism of strain rate effect of concrete can be explained by the phenomenon of Stefan effect. With this knowledge, the Laplacian transformation is employed to establish the physical mechanism based random viscosity parameter dynamic damage model of concrete. For illustration of application of the model, dynamic uniaxial compressive test which were carried out by our research team are simulated using the model and the numerical results agree well with the test results, so the valid of the model is verified.

Under high loading rate, the physical phenomenon of multiple crack propagation is explained in the framework of dynamic fracture mechanics, which, the physical mechanism of strain rate effect in high loading rate is attributed to. Based on conclusion, a modified static Griffith fracture theory is proposed to establish a physical mechanism based dynamic damage model that taking account for the dynamic multiple cracking.

On the fact that, strain rate effect is attributed to different micro physical mechanisms, a novel Boltzmann kind weight function is proposed to represent the respective contributions of different mechanisms on the dynamic damage evolution. So, a unified dynamic damage model that takes account for different physical mechanisms is obtained.

As in classical local continuum constitutive models, the micro-structure of material is not reflected and thus the intrinsic length scale is lost in these constitutive models. The drawback of these models is that, they suffer the problem of numerical difficulties when softening occurs. As for future investigation of establishing the constitutive of softening materials, nonlocal constitutive model is preliminarily employed to extend the aforementioned local dynamic damage constitutive model into nonlocal implicit gradient dynamic damage constitutive model.

**Key Words:** concrete, strain rate effect, constitutive model, dynamic damage, randomness



## 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 混凝土损伤力学研究的现状 .....	3
1.3 混凝土塑性理论及其局限性 .....	6
1.4 混凝土断裂理论研究的现状 .....	9
1.5 混凝土应变率效应研究的现状 .....	12
1.5.1 黏性损伤模型 .....	13
1.5.2 基于惯性效应的损伤模型: .....	16
1.5.3 基于裂纹动力扩展的模型 .....	19
1.5.4 其它动力损伤模型 .....	24
1.6 混凝土尺寸效应及软化材料数值稳定性 .....	27
1.7 论文的主要思路和工作 .....	30
第 2 章 混凝土黏性动力损伤本构模型 .....	31
2.1 宏观损伤力学理论的相关概念 .....	31
2.1.1 损伤变量 .....	32
2.1.2 损伤力学的等效假定 .....	35
2.1.3 损伤演化法则 .....	38
2.2 基于弹塑性损伤能释放率的静力损伤模型 .....	39
2.2.1 混凝土双标量弹塑性自由能势 .....	39
2.2.2 混凝土双标量弹塑性本构方程 .....	42
2.2.3 混凝土有效应力空间塑性演化方程 .....	43
2.2.4 基于弹塑性损伤能释放率的损伤演化方程 .....	49
2.3 基于经验损伤演化的动力损伤模型 .....	52
2.3.1 基于经验损伤演化的黏性动力损伤模型 .....	53
2.3.2 数值算法 .....	56
2.3.3 数值算例（基于经验损伤演化） .....	65
2.4 基于细观随机断裂的动力损伤模型 .....	67
2.4.1 细观随机断裂模型 .....	67
2.4.2 能量等效应变 .....	70
2.4.3 细观随机断裂模型的动力推广 .....	72

2.4.4 细观随机断裂动力损伤模型数值算法 .....	73
2.4.5 细观随机断裂动力损伤模型算例 .....	79
2.5 本章小结 .....	84
第 3 章 基于Stefan效应的细观损伤模型 .....	86
3.1 混凝土基于Stefan效应黏性机制的物理解释 .....	87
3.2 单参数动力损伤模型研究 .....	90
3.2.1 单一微元体本构关系分析 .....	91
3.2.2 宏观黏滞损伤本构关系的研究 .....	93
3.3 随机黏性动力损伤模型研究 .....	96
3.4 算例分析 .....	102
3.4.1 基于损伤演化均值数值计算分析 .....	102
3.4.2 随机性对动力强度提高系数影响 .....	103
3.5 本章小结 .....	105
第 4 章 基于裂纹动力扩展的动力损伤模型 .....	107
4.1 脆性-准脆性材料动力断裂的基本特点 .....	108
4.2 单条裂纹对冲击荷载的响应 .....	110
4.2.1 单条裂纹裂纹尖端动应力场 .....	111
4.2.2 含单条裂纹材料动拉强度 .....	122
4.2.3 含单条裂纹剪切动强度 .....	126
4.3 多条裂纹同时扩展的断裂力学分析 .....	129
4.3.1 多裂纹同时扩展的断裂动力学分析 .....	129
4.3.2 基于多裂纹同时扩展的随机动力损伤模型 .....	131
4.3.3 应变率效应的统一建模 .....	134
4.4 试验分析 .....	135
4.5 本章小结 .....	140
第 5 章 混凝土非局部隐式梯度损伤模型研究 .....	141
5.1 隐式梯度模型稳定性数学分析 .....	143
5.2 基于细观随机损伤的Over-nonlocal隐式梯度模型 .....	145
5.2.1 隐式梯度模型相关概念 .....	145
5.2.2 受拉损伤Over-nonlocal隐式梯度模型 .....	148
5.2.3 受剪损伤Over-nonlocal隐式梯度模型 .....	156
5.3 隐式梯度模型ABAQUS实现及算例 .....	159
5.3.1 隐式梯度模型有限元数值算法实现 .....	159
5.3.2 对称双切口板单轴拉伸算例 .....	161

5.3.3 非局部模型的若干问题 .....	163
5.4 本章小结 .....	165
第 6 章 结论及展望 .....	166
6.1 结论 .....	166
6.2 进一步工作的方向 .....	167
附录A 经验塑性模型应力更新 .....	168
附录B 黏性流体中Stefan效应 .....	171
附录C 第二类Fredholm积分方程的数值解 .....	174
参考文献 .....	185
致 谢 .....	203
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 .....	205