



申请同济大学工学硕士学位论文

# 基于 CT 与图像处理的混凝土本构 关系试验与数值模拟研究

(国家自然科学基金委创新研究群体资助项目 编号:50321803,50621062)  
(多机制侵蚀作用下的混凝土随机损伤本构关系研究 编号:50608057)

培养单位: 土木工程学院

一级学科: 土木工程

二级学科: 结构工程

研 究 生: 孙超

指导教师: 李杰 教授

二〇〇九年六月



A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Master of Engineering

# **Experimental and Numerical Simulation Study of Concrete Constitutive Law Based on CT and Digital Image Processing**

(Supported by the National Natural Science Foundation of China for  
Innovation Research Groups, Grant No.50321803&50621062)  
(Study on the Stochastic Damage Constitutive Law of Concrete Subjected to  
Multi-Mechanism Erosion, Grant No.50608057)

School/Department: School of Civil Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Candidate: Chao Sun

Supervisor: Prof. Jie Li

June, 2009

## 摘要

混凝土是当今世界上应用最广泛的工程材料之一。然而，其材料本身力学行为的复杂性对人们利用混凝土与把握混凝土结构在各种外部作用下的力学特性提出了重重挑战。为了弄清楚混凝土材料的破坏机理，长期以来，研究者们做了大量的试验，尝试用各种理论模型来描述、刻画它的特性，取得了长足的进展。然而，随着认识的发展，仅仅在宏观层次的研究已不能满足人们对混凝土材料破坏机理更深入理解的愿望。细观损伤力学为人们在更小尺度下探索混凝土的破坏机制提供了理论框架。

近年来，随着数值计算科学与计算机水平的高速发展，数值模拟亦即数字仿真成为继试验、理论之后第三个研究自然规律的手段。本文的主要工作是建立在细观层次上的数值模拟研究。

首先，通过对二维混凝土数字图像的处理，本文得到了二维有限元数字模型。接着对模型在 Abaqus 中模拟了单压、单拉及拉压滞回力学特性。清晰地展示了材料在荷载作用下内部裂缝的萌生与扩展过程，可视化地展示了损伤局部化现象。

为了进一步更一般的借助数值模拟研究混凝土，本文在实验室浇注了混凝土试件与水泥浆试件，其中水泥浆试件的组分与混凝土中硬化水泥浆体完全相同。文中一方面利用 CT 扫描及三维重构技术获得了与混凝土试件一一对应的三维数值试件；另一方面测试了混凝土与砂浆的力学特性与力学参数，为数值试验提供了数据依据。

在得到完整的混凝土三维数值试件的基础上，本文尝试利用 Abaqus 模拟了三维数值试件的单轴拉、压加载过程。通过与真实试验的比较，初步验证了本文三维数值模型的合理性。

**关键词：** 混凝土，细观随机损伤，CT 扫描，三维重构，损伤局部化

## ABSTRACT

Concrete is one of the most widely used materials in the modern world. Yet, due to its highly-complicated mechanical behavior, people have encountered with great challenges while using the material and understanding the mechanical responses of concrete structures subjected to external effect. In order to grasp the failure mechanism of concrete, researchers have done a large scale of experiments as well as try to model the material theoretically. With further development of knowledge on the material, the mere research on macro level is not enough to help people to understand the material. Under the circumstance, meso-scopic damage mechanics come into being and serves as a promising theoretical method.

In recent years, numerical simulation has become a third investigation tool besides experimental and theoretical study as the computational method and computer technology advance rapidly. In this paper, main efforts is focused on numerical simulation on meso-scopic level.

In the first place, a two-dimensional concrete numerical specimen is obtained by processing a concrete digital image. Then numerical simulation on the specimen subjected to uni-axial tension, compression and hysteretic loading is carried out in Abaqus. From the simulation results, one can see clearly the initiation and development of cracks in concrete as well as damage localization phenomenon.

In order to generalize the two-dimensional simulation to three-dimension, further study is carried out, including both experimental investigation and numerical simulation. First of all, three groups of concrete and mortar specimens, which have the same ingredients with the hardened cement paste in concrete, are casted and cared in the lab. Then, on one hand, the concrete specimens are scanned by X-ray CT machine based on which a three dimensional image is obtained by the performance of three dimensional reconstruction on the CT photos. On the other hand, mechanical test is implemented on both the concrete and mortar specimens

in which the mechanical model and parameters of the two are acquired and used as the basis of numerical simulation in later work.

Finally in the paper, the three dimensional concrete numerical specimens subjected to uni-axial tension and compression are numerically investigated in Abaqus. By comparison between the results from mechanical tests and the simulation result, one can find that the proposed three dimensional numerical model is rational.

**Keywords:** concrete, meso-scopic stochastic damage, CT scan, three dimensional reconstruction, damage localization.

# 目录

第 1 章 绪论.....	错误!未定义书签。
1.0 引言.....	错误!未定义书签。
1.1 混凝土力学性能细观数值模拟研究综述.....	错误!未定义书签。
1.1.1 网格模型 (Lattice Model) .....	错误!未定义书签。
1.1.2 粒子模型 (Particle Model) .....	错误!未定义书签。
1.1.3 梁-颗粒模型 (B-P Model) .....	错误!未定义书签。
1.1.4 三相复合介质有限元分析模型 (Three Phase Model) .....	错误!未定义书签。
1.2 混凝土 X-ray CT 研究综述.....	错误!未定义书签。
1.2.1 CT 技术简介及其发展.....	错误!未定义书签。
1.2.2 CT 技术在混凝土研究中的应用.....	错误!未定义书签。
1.2.3 CT 技术在混凝土研究中应用综述.....	错误!未定义书签。
1.3 本文主要工作与研究思路.....	错误!未定义书签。
1.3.1 本文工作.....	错误!未定义书签。
1.3.2 本文研究思路.....	错误!未定义书签。
1.3.3 本文主要内容.....	错误!未定义书签。
第 2 章 二维混凝土数值模型.....	错误!未定义书签。
2.0 引言.....	错误!未定义书签。
2.1 混凝土数字图像处理.....	错误!未定义书签。
2.1.1 数字图像处理概述.....	错误!未定义书签。
2.1.2 混凝土照片处理.....	错误!未定义书签。
2.2 混凝土二维有限元模型.....	错误!未定义书签。
2.2.1 骨料细观本构.....	错误!未定义书签。

---

2.2.2 砂浆细观本构模型.....	错误!未定义书签。
2.2.3 界面 (ITZ) 的细观本构模型.....	错误!未定义书签。
2.2.4 随机细观力学参数.....	错误!未定义书签。
2.2.5 细观力学参数的相关性.....	错误!未定义书签。
2.3 本章小结.....	错误!未定义书签。
第 3 章 混凝土二维模型数值试验.....	错误!未定义书签。
3.0 引言.....	错误!未定义书签。
3.1 混凝土试件原型与试验结果.....	错误!未定义书签。
3.1.1 试件单轴受拉.....	错误!未定义书签。
3.1.2 试件单轴受压.....	错误!未定义书签。
3.2 单轴受拉数值试验.....	错误!未定义书签。
3.2.1 加载图式.....	错误!未定义书签。
3.2.2 模拟结果.....	错误!未定义书签。
3.3 单压数值试验.....	错误!未定义书签。
3.3.1 加载图式.....	错误!未定义书签。
3.3.2 数值试验结果.....	错误!未定义书签。
3.4 滞回加载数值试验.....	错误!未定义书签。
3.4.1 受压滞回数值试验.....	错误!未定义书签。
3.4.2 受拉滞回加载.....	错误!未定义书签。
3.5 本章小结.....	错误!未定义书签。
第 4 章 材料力学性能试验.....	错误!未定义书签。
4.0 引言.....	错误!未定义书签。
4.1 试验目的及内容.....	错误!未定义书签。
4.1.1 实验目的.....	错误!未定义书签。

---

4.1.2 实验内容.....	错误!未定义书签。
4.2 试件制作与实验工艺.....	错误!未定义书签。
4.2.1 混凝土与水泥浆试件制作.....	错误!未定义书签。
4.2.2 试验工艺.....	错误!未定义书签。
4.3 试验系统介绍.....	错误!未定义书签。
4.4 试件力学性能试验.....	错误!未定义书签。
4.4.1 硬化水泥浆单压试验.....	错误!未定义书签。
4.4.2 硬化水泥浆试件单拉与三点弯折试验.....	错误!未定义书签。
4.4.3 混凝土单轴受压试验.....	错误!未定义书签。
4.4.4 混凝土单拉试验.....	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 CT 扫描与有限元建模.....	错误!未定义书签。
5.0 引言.....	错误!未定义书签。
5.1 CT 基本工作原理.....	错误!未定义书签。
5.1.1 线性衰减系数 $\mu(x, y)$ 的计算.....	错误!未定义书签。
5.1.2 CT 数的确定.....	错误!未定义书签。
5.1.3 CT 机的组成与功能.....	错误!未定义书签。
5.2 混凝土试件 CT 扫描与图像分析.....	错误!未定义书签。
5.2.1 混凝土试件 CT 扫描.....	错误!未定义书签。
5.2.2 图像二维特征提取与分析.....	错误!未定义书签。
5.2.3 图像识别与四相模型的建立.....	错误!未定义书签。
5.3 CT 图像三维重构.....	错误!未定义书签。
5.3.1 利用 Matlab 对 CT 图像三维重构.....	错误!未定义书签。



---

5.3.2 利用 Mimics 对 CT 图像三维重构.....	错误!未定义书签。
5.4 三相介质细观力学模型.....	错误!未定义书签。
5.4.1 骨料的细观本构与力学参数.....	错误!未定义书签。
5.4.2 硬化水泥浆细观本构与力学参数.....	错误!未定义书签。
5.4.3 界面过度区 (ITZ) 细观本构与力学参数.....	错误!未定义书签。
5.5 本章小结.....	错误!未定义书签。
第 6 章 混凝土三维模型数值模拟.....	错误!未定义书签。
6.0 引言.....	错误!未定义书签。
6.1 单拉数值试验.....	错误!未定义书签。
6.1.1 加载图式.....	错误!未定义书签。
6.1.2 数值试验结果与分析.....	错误!未定义书签。
6.2 单压数值试验.....	错误!未定义书签。
6.2.1 加载图式.....	错误!未定义书签。
6.2.2 数值试验结果与分析.....	错误!未定义书签。
6.3 本章小结.....	错误!未定义书签。
第 7 章 结论与展望.....	错误!未定义书签。
7.1 结论.....	错误!未定义书签。
7.2 进一步研究工作展望.....	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。