



数据加载失败，请稍后重试！



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

多相材料随机细观力学模型及其在电化 学沉积修复混凝土中的应用

姓 名：陈庆

学 号：1010020122

所在院系：土木工程学院/地下建筑与工程系

学科门类：土木工程

学科专业：隧道及地下建筑工程

指导教师：朱合华 教授

副指导教师：朱建文 教授（UCLA） 闫治国 副教授

二〇一四年五月



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 stochastic micromechanical models of the
multiphase materials and their applications for the
concrete repaired by electrochemical deposition method**

Candidate: Qing Chen

Student Number: 1010020122

College/Department: Civil Engineering/Geotechnical Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Tunnel and underground engineering

Supervisor: Prof. Hehua Zhu

Co- Supervisor: Prof. Woody Ju(UCLA) and Zhiguo Yan

May, 2014

多相材料随机细观力学模型及其在电化学沉积修复混凝土中的应用

陈庆

同济大学

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；学校有权保存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

由于生产或者形成过程无法完全控制,且各相组分性能自身存在差异,工程材料宏观性能呈现随机性特点。为了探索导致工程材料宏观性能随机性的深层次原因,本论文提出了多相材料随机细观力学模型。同时,作为一种颇具发展前景的水环境下既有钢筋混凝土结构修复手段,电化学沉积修复法的微细观修复机理和理论模型几乎空白,因此,论文采用多孔混凝土试件进行了一系列电化学沉积修复试验,并基于此,分别提出了描述电化学沉积修复混凝土的多相材料确定性和随机性细观力学模型。主要内容如下:

第一,采用应变集中张量定义材料的有效模量,并基于已有成果获取该应变集中张量的近似解析解,形成本论文的确定性细观力学模型;然后,采用随机向量对多相材料的微观结构进行描述,为获取材料宏观有效性能的概率特征:(1)首次提出了包含维数分解、牛顿插值和蒙特卡洛法在内的随机模拟方法。在保证精度情况下,该模拟方法可以大大减少求解细观力学方程的次数。(2)首次将最大熵原理应用于多相材料宏观有效性能的概率表征;同时,对有效性能参数进行标准化处理,使得求解结果更为稳定。实例验证由该方法获取的材料宏观有效性能的概率密度更为合理。

第二,为了获取电化学沉积修复过程混凝土不同尺度上的结构特征,采用宏观试验相结合的手段深入认识电化学沉积修复的机理:采用超声检测和渗透试验等方法获取试件宏观性能;采用医学 CT 和工业 CT 观测试件内部孔隙分布和沉积物分布等;采用 SEM 等手段研究电化学沉积产物的微观结构和界面结构等;同时采用修复评价指标的统计特征对修复效果进行更为合理的评价。

第三,以所提(随机)细观力学模型为理论指导,以试验观测结果为物理基础,分别提出了描述电化学沉积修复混凝土的确定性和随机细观力学模型:(1)将传统的混凝土骨料,砂浆及两者的界面视为基体相,将孔隙、水和电化学沉积产物视为夹杂相,建立电化学沉积修复(非饱和)混凝土的确定性细观力学模型,为了预测所提(微)细观力学模型的有效性能,采用了多层次均匀化的思路进行处理。为了推广 Mori-Tanaka 方法的应用,引入近似修正函数,使其可以用于预测等效夹杂的有效模量;为了考虑干燥等条件的影响,又对所提模型进行了修正。

(2)以所提电化学沉积修复混凝土确定性细观力学模型为基础,考虑材料自身和修复过程的客观不确定因素,采用非平稳随机过程描述电化学沉积产物的生长,建立了描述电化学沉积修复混凝土的多相材料随机细观力学模型,为从细观层次定量描述修复过程混凝土宏观性能概率密度演化提供理论手段。

最后，关于进一步工作的方向进行了简要的讨论。

关键词：多相材料，随机细观力学模型，电化学沉积修复法，混凝土

ABSTRACT

The macroscopic properties of engineering materials appear randomness due to the fact that their formation or production process can't be fully controlled and that there are inherent variations of their components. This thesis presents stochastic micromechanical models to explore the reasons for the randomness of the materials' macroscopic properties. At the same time, as a new method for repairing the existing reinforced concrete structures at the aqueous environment, the electrochemical deposition method seems to be promising. However, very few studies have been conducted to enclose the healing mechanism, not to mention the theoretical models. Therefore, the thesis adopts the porous concrete specimens to perform the electrochemical deposition tests, and then both deterministic and stochastic micromechanical models are proposed to describe the healing process.

Firstly, strain concentration tensors are employed to define the effective modulus of materials. The approximate analytical solution for the concentration tensors are derived based on the existing results to form the deterministic micromechanical models of this paper. The materials' microstructures are described using random vectors. To obtain the probabilistic characters of macroscopic effective properties: (1) a novel stochastic simulation scheme including the dimension decomposition, Newton interpolation and the Monte Carlo method is proposed, which can greatly reduce the number of solving the micromechanical equations with the high precision. (2) The maximum entropy principle was first time applied to obtain the probability representation of macroscopic effective properties of the multiphase materials; meanwhile the standardizing procedures of effective properties make the results more stable. Examples show that the proposed method can obtain more reasonable probability density of the materials' macroscopic effective properties.

Secondly, in order to obtain the concrete structure features at different scales during the healing process, both macro and micro scale tests are performed to understand the healing mechanism of electrochemical deposition repair: by adopting the method of ultrasonic testing and penetrant test, the macro-scale performance of specimen are observed; The medical CT and industrial CT are employed to observe the specimen's internal pore distribution and sediment distribution. The SEM test is used to observe the microstructure of electrochemical deposition and the interface

structure. At the same time, the statistical characteristics of the evaluation indexes are adopted to access the repairing effect more reasonably.

Thirdly, both deterministic and stochastic micromechanical models are presented to describe the healing process based on the experimental observations and the theoretical framework proposed. (1) In the deterministic model, the traditional concrete aggregate, mortar and their interface are merged as the matrix phase, and the pores, water, and electrochemical deposition product are seen as the inclusion phases. In order to predict the effective properties of the proposed model, a multi-level homogenization scheme is adopted. In order to extend the application of Mori-Tanaka method, the approximate modified function is introduced, with which the effective modulus of equivalent inclusion can be predict. In order to consider the influence of drying condition, some other corrections have been employed for the proposed model.(2) By considering the uncertainty factors of materials and the repairing process, the non-stationary random process is employed to describe the growth of the electrochemical deposition product. Then the proposed deterministic model is extended to a stochastic one, which provides a theoretical approach to describe the probability density evolution of macro performance at the micro-level.

Finally, the problems requiring further studies are discussed.

Key Words: multiphase material, stochastic micromechanical model, electrochemical deposition method, concrete

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言.....	1
1.2 细观力学模型研究现状.....	2
1.2.1 确定性细观力学模型.....	2
1.2.2 随机细观力学模型.....	4
1.3 电化学沉积修复混凝土研究现状.....	5
1.3.1 混凝土的多尺度特征和修复的主要方法.....	5
1.3.2 电化学沉积修复混凝土试验研究现状.....	7
1.3.3 电化学沉积修复混凝土细观力学模型研究现状.....	10
1.4 存在问题、本论文主要内容和创新点.....	12
1.4.1 存在问题.....	12
1.4.2 本论文主要内容.....	12
1.4.3 本论文主要创新点.....	14
第 2 章 含球形夹杂多相材料的随机细观力学模型	16
2.1 工程材料特点与表征手段.....	16
2.1.1 工程材料的特点与表征手段.....	16
2.1.2 随机变量、随机过程和随机场.....	16
2.2 含球形夹杂多相材料的确定性细观力学框架.....	17
2.2.1 有效模量与应变集中张量.....	17
2.2.2 应变集中张量的一种近似解法.....	18
2.2.3 若干实例.....	20
2.3 含球形夹杂多相材料的随机细观力学框架.....	21
2.3.1 微结构的随机描述.....	21
2.3.2 一种多随机变量函数的随机模拟方法.....	22
2.4 数值模拟和讨论.....	23
2.4.1 确定性模型的验证.....	24
2.4.2 随机模型的验证.....	28
2.4.3 关于泊松比和弹性模型相关性的讨论.....	33
2.5 小结.....	38
第 3 章 基于最大熵的两相材料随机细观力学模型	39
3.1 考虑夹杂间相互作用的两相材料细观力学模型.....	39
3.1.1 考虑夹杂间相互作用的应变集中张量.....	39
3.1.2 考虑夹杂间相互作用的复合材料有效模量.....	40
3.2 两相复合材料微结构的随机描述.....	41

3.3 两相材料宏观有效性能的概率特征.....	41
3.3.1 最大熵原理.....	41
3.3.2 基于蒙特卡洛法的有效性能 L 阶原点矩.....	42
3.3.3 基于最大熵的有效性能概率密度函数.....	42
3.4 数值模拟和讨论.....	44
3.4.1 确定性模型的验证.....	44
3.4.2 随机细观力学模型的验证.....	48
3.5 小结.....	57
第 4 章 电化学沉积修复混凝土试验研究.....	59
4.1 电化学沉积修复混凝土试验总体思路.....	59
4.2 修复试件制备与电化学修复试验装置设计.....	60
4.2.1 试件材料.....	60
4.2.2 试件配比及尺寸.....	61
4.2.3 电化学修复装置及修复环境设计.....	62
4.3 评估电化学沉积修复效果的试验方法和设备.....	64
4.3.1 超声波检测试验.....	64
4.3.2 孔隙率测量试验.....	66
4.3.3 电化学沉积产物微观结构与分布观察试验.....	66
4.3.4 渗透试验.....	68
4.3.5 力学试验.....	68
4.4 电化学沉积修复混凝土的试验结果与分析.....	69
4.4.1 超声波速度.....	69
4.4.2 孔隙率.....	74
4.4.3 电化学沉积产物的微观结构与分布.....	77
4.4.4 渗透时间记录.....	79
4.4.5 力学性能.....	80
4.4.6 混凝土基体 (intrinsic concrete) 材料参数.....	83
4.5 小结.....	84
第 5 章 电化学沉积修复混凝土确定性细观力学模型及应用.....	85
5.1 电化学沉积修复混凝土细观力学模型.....	85
5.1.1 修复混凝土的细观结构.....	85
5.1.2 有效孔隙率和饱和度.....	85
5.1.3 修复混凝土的细观力学模型.....	86
5.2 Mori-Tanaka 法预测等效夹杂有效模量的近似修正函数.....	86
5.2.1 Mori-Tanaka 法简介.....	86
5.2.2 Mori-Tanaka 法预测等效夹杂有效模量的修正函数.....	88
5.2.3 修正函数的近似解.....	89
5.3 修复混凝土有效模量预测.....	91

5.3.1 多层次均匀化的思想.....	91
5.3.2 等效夹杂的有效性能.....	92
5.3.3 等效基体的有效性能.....	93
5.3.4 修复混凝土的有效性能.....	93
5.3.5 修复混凝土有效性能的若干修正.....	94
5.4 预测结果的试验验证与讨论.....	96
5.4.1 修复过程验证.....	96
5.4.2 修复极限状态验证.....	98
5.4.3 影响修复效果的若干因素讨论.....	100
5.5 小结.....	105
第6章 电化沉积修复混凝土随机细观力学模型及应用	106
6.1 电化沉积修复过程的随机描述.....	106
6.1.1 电化沉积修复过程的随机性.....	106
6.1.2 电化沉积修复试件各组分性能的随机描述.....	106
6.1.3 电化沉积产物含量的随机描述.....	107
6.1.4 Karhunen-Loeve 分解	107
6.2 电化沉积修复饱和混凝土的细观力学框架.....	108
6.2.1 基于微结构的修复饱和混凝土的细观力学模型.....	108
6.2.2 分层均匀化获取有效模量.....	109
6.3 随机微观力学模型预测结果及验证.....	111
6.3.1 K-L 分解结果及其验证	111
6.3.2 随机微观力学模型预测结果及其验证.....	115
6.3.3 混凝土基体随机性对修复后材料宏观性能概率特征的影响.....	117
6.3.4 电化沉积产物随机性对修复后材料宏观性能概率特征的影响..	121
6.4 小结.....	127
第7章 结论与展望	128
7.1 结论.....	128
7.2 展望.....	130
致谢	132
参考文献	133
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	144

主要符号

$\bar{\sigma}$	代表性体积单元平均应力	E^*	复合材料的有效体积模量
$\bar{\sigma}_0$	代表性体积单元基体相平均应力	ν_0	基体的泊松比
$\bar{\sigma}_r$	代表性体积单元第 r 相夹杂平均应力	ν_i	第 i 相夹杂的泊松比
$\bar{\varepsilon}$	代表性体积单元平均应变	Ω	样本空间
$\bar{\varepsilon}_0$	代表性体积单元基体相平均应变	ξ	样本空间的子集
$\bar{\varepsilon}_r$	代表性体积单元第 r 相夹杂平均应变	P	概率或者概率测度
C_*	复合材料有效刚度	$\mathbf{R}^N$	N 维实向量空间
C_0	基体相的弹性刚度张量	$\mathbf{r}_m$	$\mathbf{R}$ 的第 m 个样本
C_r	第 r 相夹杂的弹性刚度张量	M	样本数量
V	代表性体积单元的体积	$\mathbf{D}^V$	刚度张量的 Voigt 上界
V_m	代表性体积单元中基体的体积	$\mathbf{D}^R$	刚度张量的 Reuss 下界
V_r	代表性体积单元中第 r 相夹杂的体积	$\mathbf{M}_r$	第 r 相夹杂的柔度张量
n	夹杂的相数	K^V	体积模量 Voigt 上界
$\mathbf{B}_r$	第 r 相夹杂的应变集中张量	μ^V	剪切模量 Voigt 上界
ϕ_r	第 r 相夹杂的体积含量	E^V	杨氏模量 Voigt 上界
$\varepsilon'(\mathbf{x})$	夹杂相产生的扰动应变场	K^R	体积模量 Reuss 下界
$\varepsilon^*(\mathbf{x})$	本征应变	μ^R	剪切模量 Reuss 下界
$\mathbf{G}(\mathbf{x}-\mathbf{x}')$	线弹性均匀基体中的格林函数	E^R	杨氏模量 Reuss 下界
δ_{ij}	克罗内克符号	NE^*	标准化处理后的杨氏模量
ν_0	基体的泊松比	$N\mu^*$	标准化处理后的剪切模量
$\mathbf{S}$	Eshelby 张量	NK^*	标准化处理后的体积模量
Ω_r^i	r 相夹杂中第 i 个颗粒的体积	E_{Hs1}^*	杨氏模量的 H-S 上或下限
N_r	r 相夹杂中颗粒总数	E_{Hs2}^*	杨氏模量的 H-S 上或下限
K^*	复合材料的有效体积模量	μ_{Hs1}^*	剪切模量的 H-S 上或下限
K_0	基体的体积模量	μ_{Hs2}^*	剪切模量的 H-S 上或下限
K_i	第 i 相夹杂体积模量	K_{Hs1}^*	体积模量的 H-S 上或下限
μ^*	复合材料的有效剪切模量	K_{Hs2}^*	体积模量的 H-S 上或下限
μ_0	基体的剪切模量	E_d	材料的动弹性模量
μ_i	第 i 相夹杂剪切模量	α	等效的长短轴比

S_{eff}	有效饱和度	χ_{μ}	剪切模量修正系数
V_{P-sat}	水完全充满的孔隙体积	χ_E	杨氏模量修正系数
V_P	混凝土的总的孔隙体积	χ_K	体积模量修正系数
ϕ_{eff}	修复混凝土的有效孔隙率	V_{int}	混凝土基体的体积

第1章 绪论

1.1 引言

由于各组分自身差异（如混凝土中的骨料、砂浆等）、生产或者形成过程无法完全控制等因素，工程材料的微观结构在时间、空间上往往呈现明显的随机性，这导致工程材料宏观特性一般亦具有随机性，因此，在相同外部作用下，工程结构的反应性态也表现出不同程度的随机性。《工程结构可靠度设计统一标准（GB 50153-92）》明确规定工程材料性能宜采用随机变量概率模型描述。为获取材料性能的概率分布类型和统计参数，当前做法主要以试件宏观试验数据为基础，运用参数估计方法和概率分布的假设检验方法确定。然而，该方法无法揭露导致工程材料宏观性能随机性的内在原因（如各组分自身性能差异、空间分布差异等），很难为新材料设计、既有材料结构性能评估和改善等提供参考。

得益于数学、物理学、化学、材料科学、生物学、流体力学等各个领域科学家的共同努力，多尺度分析已成为研究材料不同尺度性能关联的重要手段(Bernard 等, 2003; Mondal, 2008; Abu Al-Rub 等, 2010; 柴立和, 2005)。唐人魏征言：“欲流之远者，必浚其泉源；求木之长者，必固其根本”。固本浚源，正体现了材料多尺度分析的重要意义。本论文试图以多尺度分析为手段，从材料的微细观结构出发（即各组分材料的性能、形态以及空间分布等）探索导致材料宏观性能不确定性的原因，为材料的生产、设计提供理论指导。

多尺度分析范畴广泛，包括（微）细观力学、纳米力学、位错动力学模拟、拟连续介质模拟以及关于材料的强度模拟等(范镜泓, 2008)。其中，确定性（传统）细观力学（来源于英文单词“Micromechanics”，国内有些文献也称其为微观力学）连接了材料的微细观结构和宏观性能，为从微细观层次揭示材料宏观性能特点提供了重要手段(范镜泓, 2008; Torquato, 2001)。然而，材料确定性细观力学模型是采用某种意义的均值参数（如整体平均参数或者体积平均参数）描述材料的微细观结构，即不承认或者完全忽略了材料微观结构固有的变异性。为了刻画微细观结构不确定性（变异性）对宏观性能的影响，Ferrante 和 Graham-Brady(2005)等引入功能梯度材料微细观结构随机描述，提出了功能梯度材料的随机细观力学模型，为从微细观层次揭示功能梯度材料宏观性能的不确定提供手段。类似研究还有 Guilleminot 等(2008)，Guilleminot 等(2009)，Sriramula 和 Chryssanthopoulos(2009)，Caro 等(2010)等。基于此背景，本论文试图在确定性细观力学模型的基础上，引入材料微细观结构的随机描述和随机函数概率特征

获取方法, 提出多相复合材料的随机细观力学模型 (如图 1.1 所示), 丰富材料随机多尺度模拟的内容, 为新材料的生产、设计, 既有材料性能预测和改善等提供理论基础。



图 1.1 材料随机细观力学模型

此外, 作为一种颇具发展前景的水环境下既有钢筋混凝土结构修复手段, 电化学沉积修复方法已引起国内外众多学者的注意 (Ryu,2003a,2003b; Ryou 和 Otsuki,2005; Jiang 等, 2008)。目前, 对电化学沉积修复方法的研究还主要集中在电化学沉积修复试件制作、修复效果评价及其影响因素分析等内容上。对于电化学沉积修复过程, 混凝土微观结构的演化及其与宏观性能的定量关系研究很少, 尚未见有关电化学沉积修复混凝土的 (随机) 细观力学模型。鉴于此, 首先, 论文采用多孔混凝土试件进行电化学沉积修复试验, 并采用宏微观试验手段, 对修复过程试件的微观结构和宏观性能进行测量, 进一步揭示电化学沉积修复的机理; 其次, 作为本论文所提 (随机) 细观力学模型思想的一个应用, 也作为电化学沉积修复方法在理论模型方面的进一步探索, 论文基于一系列电化学沉积修复混凝土宏微观试验结果, 从修复混凝土微观结构和宏观性能的演化出发, 建立了描述电化学沉积修复混凝土的确定性多相材料细观力学模型; 并在此基础上, 考虑材料自身和修复过程等的客观不确定因素, 采用非平稳随机过程描述电化学沉积产物的生长, 建立了描述电化学沉积修复混凝土的多相材料随机细观力学模型, 为修复过程混凝土宏观性能概率密度演化提供理论手段。

1.2 细观力学模型研究现状

1.2.1 确定性细观力学模型

一般认为, 材料的微细观结构包括各组分子力学性能、体积含量、形状、朝向以及空间分布等信息; 材料的宏观性能包括材料力学参数、渗透系数、导热系数