



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

钢筋混凝土结构随机非线性
分析理论研究

(国家自然科学基金重大研究计划 编号: 91315301)
(国家自然科学基金重大国际合作项目 编号: 51261120374)
(国家留学基金委资助 学号: 201406260112)

姓 名: 冯德成
学 号: 1210006
所在院系: 土木工程学院
学科门类: 工学
学科专业: 结构工程
指导教师: 李杰 教授
联合指导教师: Prof. James M. Ricles

二〇一六年一月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

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

Stochastic Nonlinear Analysis Theory of Reinforced Concrete Structures

(Funded by the Natural Science Foundation of China for Major Research Project,
Grant No. 91315301; by the Natural Science Foundation of China for Major
International Joint Research Program, Grant No. 51261120374 and by the China
Scholarship Council, Student No. 201406260112)

Candidate: Decheng Feng
Student Number: 1210006
School/Department: Civil Engineering
Discipline: Engineering
Major: Structural Engineering
Supervisor: Prof. Jie Li
Co-Supervisor: Prof. James M. Ricles

January, 2016

摘 要

本文从混凝土随机损伤力学的基本观点出发,较为系统地研究了混凝土结构的随机非线性反应分析理论与可靠度评价方法。

详细介绍了混凝土细观随机断裂模型,采用试验获得的平均应力-应变关系曲线和《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)中的混凝土经验本构关系,标定了细观随机断裂模型的工程参数。考虑了结构中钢筋-混凝土之间的相互作用,对素混凝土本构模型进行修正,提出了钢筋混凝土复合材料的单轴随机损伤本构模型。通过一系列对钢筋混凝土构件试验的模拟分析,验证了本文建议模型的有效性。

对比分析了构件轴心受压与偏心受压对箍筋约束效应的影响,在现有箍筋约束混凝土模型的基础上引入等效约束体积的概念,建立了应变梯度修正系数的计算公式,以反映偏心受压构件中偏心率对箍筋有效约束力的影响。结合上述箍筋约束模型,考虑截面偏心率在计算过程中的动态变化,提出了一类新的偏心受压约束纤维梁柱单元。

针对柔度法梁柱单元模拟软化行为时的变形局部化问题,研究了其内在物理机制和数值特性,并对比分析了现有的规则化技术。根据钢筋混凝土构件的损伤破坏机理,发展了两类新的单元:自适应损伤扩展单元和隐式梯度梁柱单元。前者从数值积分角度出发,通过实现塑性区长度的动态扩展,构造范德蒙矩阵求解非塑性较区的数值积分点权重,克服了数值计算中的积分敏感性问题;后者则从物理机制出发,基于非局部理论和隐式梯度理论,将截面变形视为非局部变量,引入尺度参数,解决了软化行为模拟中的变形局部化现象。

研究了钢筋混凝土剪力墙结构受力行为的基本特性与现有的受剪分析理论,指出:剪力墙结构模拟的关键在于合理地反映配钢筋后混凝土的“受拉刚化”和“拉-压软化”效应。通过在随机损伤本构理论框架中引入软化系数,建立了可以反映拉-压应力状态下的混凝土受压强度软化的多维损伤模型。为了克服修正后的模型拉、压区耦合引起的数值不稳定与收敛性问题,提出了一类双尺度一致割线刚度算法,即在结构层次采用拟牛顿算法进行迭代,而材料层次返回相应的割线模量。采用塑性偏移技术,解决了模拟结构滞回行为时材料割线模量的加卸载指向性问题。最终,通过系列的数值算例验证了本文建议模型与算法的精度和稳定性。

进行了八榀具有相同几何尺寸的单层两跨钢筋混凝土框架静力全过程推覆覆试验。试验模型采用相同批次的钢筋、相同标号的混凝土一次浇筑而成,并采用

相同的养护条件和加载制度进行试验,以研究钢筋混凝土框架结构的随机非线性行为特性。试验结果表明:材料的随机损伤及其与非线性的耦合效应,引起了结构损伤演化进程中显著的非线性随机涨落现象,且内力层次的涨落远大于结构荷载-位移层次的涨落。基于传统的确定性分析方法对该试验模型进行模拟,发现传统方法不能正确反映真实的内力重分布进程。基于概率密度演化理论对试验模型进行随机反应分析,结果表明:概率密度演化理论可以合理地反映混凝土结构的随机非线性力学行为,不仅可以计算结构反应的均值、方差,而且可以获得结构各个层次反应的概率密度函数,从而实现了随机损伤演化“从本构到结构”的反映。

结合上述一系列研究,对某大型混凝土复杂工程结构进行了随机地震反应分析。基于本文提出的材料本构关系和单元模型建立了相应的有限元模型;结合本文建议的数值算法和概率密度演化理论,获得了结构反应概率密度分布及其随时间变化的演化过程;通过吸收边界方法,计算了结构的抗震可靠度。从而,验证了本文理论在实际工程中的实用性。

最后,对进一步研究的方向进行了简要的讨论。

关键词: 钢筋混凝土结构, 非线性, 随机性, 随机损伤力学, 柔度法梁柱单元, 变形局部化, 剪力墙, 拉-压软化, 概率密度演化, 可靠度

ABSTRACT

Starting from the fundamental viewpoints of concrete stochastic damage mechanics, this thesis comprehensively studies the nonlinear stochastic analysis theory and reliability assessment method of reinforced concrete (RC) structures.

The microscopic stochastic rupture model (SRM) for concrete is introduced and the relationships between the micro model parameters and macro engineering parameters are then derived based on the mean stress-strain curves by experiments and Chinese design code. Meanwhile, some modifications are made on the original SRM model in order to consider the complicated interaction effects between reinforcement steels and concrete in real structures. A series of numerical simulations are made to experiments of RC members, showing the accuracy of the present model.

The influence of uniaxial and eccentric compression on the confined effect of RC members is analyzed respectively. An equivalent confining volume condition is introduced to previous confined concrete models to set up the formula of strain gradient factor under eccentric compression, which can reflect the effect of the eccentricity on the confining force. With the proposed confined concrete model, a new confined fiber beam-column element for eccentric loading is developed, which can account for the time varying process of the section eccentricity ratio.

For the localization issues in force-based beam-column element while modeling strain softening behaviors, the physical mechanism and the numerical characteristic are discussed and the existing regularization techniques are reviewed. According to the damage and failure features of RC members, two kinds of elements are developed: the adaptive damage spread element (ADSE) and the implicit gradient frame element (IGFE). The first approach solves the problem from the viewpoint of numerical integral. By adjusting the plastic hinge length at every loading step, the integration weights of the points outside the plastic hinge region are calculated according to Vandermonde matrix to avoid the integral sensitivity. The second approach treats the sectional deformation as a nonlocal variable based on the nonlocal theory and implicit gradient theory, which have a clear physical background, and introduces an internal length scale to overcome the localization issues in strain softening problems.

The fundamental characteristics of the behavior of RC shear wall and the current shear analysis method are analyzed and the two important factors in shear problems,

i.e., tension stiffening and tension-compression softening, are pointed out. A softening coefficient is introduced to the multi-dimensional stochastic damage model, to reflect the reduction of compressive strength of concrete in tension-compression stress state. In addition, a two level consistent secant stiffness based nonlinear solution algorithm is adopted to overcome convergence problems caused by the coupling of tension and compression in the model. A plasticity offset technique is presented for the simulation of cyclic loading situation. Several numerical examples are presented against experimental results finally, demonstrating that the proposed model is capable to predict the typical shear behavior of RC structures.

Eight one-story two-bay RC frames with the same geometric dimension and reinforcing subjected to static lateral load are tested. The test specimens are constructed with the concrete and steel from the same batch and the curing condition, and loading scheme is also the same in order to investigate the stochastic nonlinear behaviors of the frames. The test results indicate that the coupling effect of nonlinearity and randomness inherent in the material cause the fluctuation of the damage evolution process, and the fluctuation on the internal forces level is much greater than that on the load-displacement level. The deterministic analysis cannot predict the realistic re-distribution process of internal forces. However, the stochastic response analysis based on probability density evolution method (PDEM) can not only attain the mean value and the standard deviation of the responses, but also get the probability density functions (PDF) of the responses at different levels, realizing the reflection of the stochastic damage evolution from material to structure.

Applications of the aforementioned researches are made to an existing RC complex high-rise building. The finite element model is built based on the material and element model proposed in this thesis. The PDF distribution of the structural responses and its evolution process against time are obtained by the PDEM. Then the structural dynamic reliability is calculated by the PDEM combined with the absorbing boundary method, which verifying the practical value of the presented theory.

Finally, a brief discussion on the future works is given.

Key Words: RC structure, nonlinearity, randomness, stochastic damage mechanics, force-based beam-column element, localization, shear wall, tension compression softening, probability density evolution, reliability

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
目 录.....	V
第 1 章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 混凝土损伤本构关系述评	2
1.2.1 混凝土损伤本构关系.....	2
1.2.1.1 确定性损伤本构关系.....	2
1.2.1.2 随机损伤本构关系.....	4
1.2.2 应变局部化与非局部理论.....	6
1.2.3 钢筋-混凝土相互作用	7
1.2.3.1 受拉刚化效应.....	7
1.2.3.2 箍筋约束效应.....	8
1.3 混凝土结构确定性非线性分析方法述评	10
1.3.1 混凝土框架结构分析.....	10
1.3.2 混凝土剪力墙结构分析.....	11
1.3.2.1 剪力墙宏观单元模型.....	12
1.3.2.2 剪力墙细观单元模型.....	13
1.4 结构随机反应分析理论述评	15
1.5 本文思路与主要工作	17
第 2 章 混凝土随机损伤本构关系理论与工程应用	21
2.1 混凝土细观随机断裂模型	21
2.1.1 模型概述.....	21
2.1.2 随机损伤变量的均值与标准差.....	23
2.1.3 经验塑性应变.....	26
2.1.4 滞回规则.....	27
2.2 细观随机断裂模型参数与宏观工程参数的关系	28
2.3 考虑钢筋-混凝土复合效应的修正	31
2.3.1 受拉刚化效应.....	31
2.3.2 箍筋约束效应.....	32
2.4 工程应用实例	33
2.4.1 钢筋混凝土柱推覆试验.....	34
2.4.2 钢筋混凝土梁渐进破坏试验.....	35
2.5 本章小结	36
第 3 章 偏心受压约束纤维梁柱单元	37

3.1 箍筋约束混凝土受力机理	37
3.1.1 轴心受压构件	37
3.1.2 偏心受压构件	38
3.2 考虑偏心率影响的箍筋约束本构模型	40
3.2.1 经验模型	40
3.2.1.1 Mander 箍筋约束混凝土模型	40
3.2.1.2 截面应变梯度修正系数	41
3.2.2 随机损伤本构模型	45
3.3 偏心受压约束纤维梁柱单元	46
3.3.1 纤维梁柱单元截面分析	46
3.3.2 偏心率动态更新算法	48
3.4 分析实例	50
3.4.1 偏心受压柱截面分析	50
3.4.2 钢筋混凝土柱推覆分析	51
3.5 本章小结	52
第 4 章 钢筋混凝土梁柱单元变形局部化问题研究	53
4.1 柔度法梁柱单元	53
4.1.1 单元格式	53
4.1.2 单元状态确定	55
4.2 变形局部化问题	58
4.2.1 积分敏感性	60
4.2.2 物理机制分析	62
4.3 现有规则化技术	63
4.4 自适应损伤扩展单元	65
4.4.1 塑性区长度计算	66
4.4.2 积分权重计算	68
4.4.3 分析实例	68
4.4.3.1 钢筋混凝土柱单调加载	68
4.4.3.2 钢筋混凝土柱反复加载	70
4.5 基于隐式梯度理论的柔度法梁柱单元	72
4.5.1 理论背景	72
4.5.1.1 积分型非局部理论	72
4.5.1.2 隐式梯度理论	74
4.5.1.3 积分型非局部理论与隐式梯度理论的联系	75
4.5.2 单元构造	76
4.5.2.1 非局部变量	76
4.5.2.2 单元数值算法	76
4.5.2.3 梯度系数的确定	78
4.5.3 分析实例	79

4.5.3.1 悬臂梁数值算例.....	79
4.5.3.2 钢筋混凝土柱单调加载.....	82
4.6 本章小结.....	84
第 5 章 考虑拉压软化效应的钢筋混凝土剪力墙结构分析.....	85
5.1 剪切分析理论与模型.....	85
5.1.1 修正斜压场理论.....	86
5.1.2 软化桁架理论.....	88
5.2 混凝土软化随机损伤本构模型.....	91
5.2.1 随机损伤力学.....	91
5.2.1.1 损伤力学基本框架.....	91
5.2.1.2 随机损伤演化法则.....	93
5.2.1.3 经验塑性变形.....	94
5.2.2 钢筋混凝土单元剪切行为分析.....	95
5.2.3 综合拉-压软化系数.....	96
5.3 一致割线刚度算法.....	98
5.3.1 割线刚度算法.....	100
5.3.2 双尺度一致割线模量.....	100
5.3.3 塑性偏移.....	102
5.4 分析实例.....	103
5.4.1 单调加载.....	103
5.4.1.1 钢筋混凝土剪切板.....	103
5.4.1.2 钢筋混凝土简支梁.....	105
5.4.1.3 钢筋混凝土剪力墙.....	108
5.4.2 反复加载.....	111
5.4.2.1 钢筋混凝土剪力墙-Thomsen and Wallace.....	111
5.4.2.2 钢筋混凝土剪力墙-Maier and Thürlimann.....	113
5.5 本章小结.....	114
第 6 章 钢筋混凝土框架结构随机非线性反应试验研究.....	115
6.1 内力测量传感器设计与制作.....	115
6.1.1 传感器设计与制作.....	116
6.1.2 传感器标定.....	118
6.1.2.1 标定原理.....	118
6.1.2.2 测力杆标定.....	119
6.1.2.3 传感器整体标定.....	120
6.2 框架试验模型设计与制作.....	123
6.2.1 框架选型与截面布置.....	123
6.2.2 框架设计荷载与配筋计算.....	124
6.2.3 试验模型制作.....	126
6.3 材料力学性能试验.....	129

6.3.1 钢筋材性试验.....	129
6.3.2 混凝土材性试验.....	130
6.4 钢筋混凝土框架结构静力推覆全过程试验	132
6.4.1 试验设备与试验方法.....	132
6.4.2 试验结果.....	134
6.4.2.1 试验现象.....	134
6.4.2.2 荷载-位移曲线	135
6.4.2.3 开裂次序.....	137
6.4.2.4 钢筋应变.....	139
6.4.2.5 出铰次序.....	140
6.4.2.6 内力进程.....	142
6.4.2.7 柱反弯点变化.....	144
6.4.3 试验分析.....	146
6.4.3.1 随机非线性过程.....	146
6.4.3.2 不同尺度上的变异性	147
6.4.3.3 结构分析方面的参考	149
6.5 本章小结	149
第 7 章 钢筋混凝土框架结构随机非线性反应数值模拟	151
7.1 钢筋混凝土结构确定性分析模型	151
7.2 试验框架结构的确定性反应分析	151
7.2.1 有限元模型.....	151
7.2.2 确定性分析结果.....	152
7.3 钢筋混凝土框架结构随机反应分析方法	154
7.3.1 广义概率密度演化方程.....	154
7.3.2 框架结构静力随机非线性反应分析方法	156
7.3.3 数值算法.....	157
7.3.4 TVD 差分格式.....	158
7.4 试验框架结构的随机反应分析	159
7.4.1 材料参数.....	159
7.4.2 荷载-位移曲线	160
7.4.3 内力进程.....	162
7.5 本章小结	165
第 8 章 复杂高层结构随机非线性反应分析与可靠度评价	167
8.1 工程背景	167
8.2 有限元分析模型	167
8.2.1 结构模型.....	167
8.2.2 显式动力积分算法.....	169
8.2.3 地震动选取.....	170
8.3 结构随机反应分析	171

8.3.1 均值参数结构反应分析	172
8.3.2 结构随机反应分析	175
8.4 结构抗震可靠度评价	183
8.4.1 吸收边界方法	183
8.4.2 抗震性能可靠度评价	184
8.5 本章小结	185
第 9 章 结论与展望	187
9.1 结论	187
9.2 展望	189
附录 A 混凝土细观随机断裂滞回模型	191
A.1 微观弹簧表述	191
A.2 细观单元求解	193
A.3 滞回规则建模	194
A.3.1 单调加载曲线	194
A.3.2 卸载及再加载曲线	195
A.3.3 次滞回	197
A.3.4 拉、压相互作用	198
A.4 数值算例	198
A.4.1 重复受拉、受压	199
A.4.2 反复拉压	200
A.4.3 非等幅重复加载	200
附录 B 无条件稳定显式积分 KR-α 算法及应用	203
B.1 无条件稳定显式积分 KR- α 算法	203
B.2 钢筋混凝土框架结构显式动力倒塌分析	204
参考文献	207
致 谢	219
个人简历、在读期间发表学术论文与研究成果	223