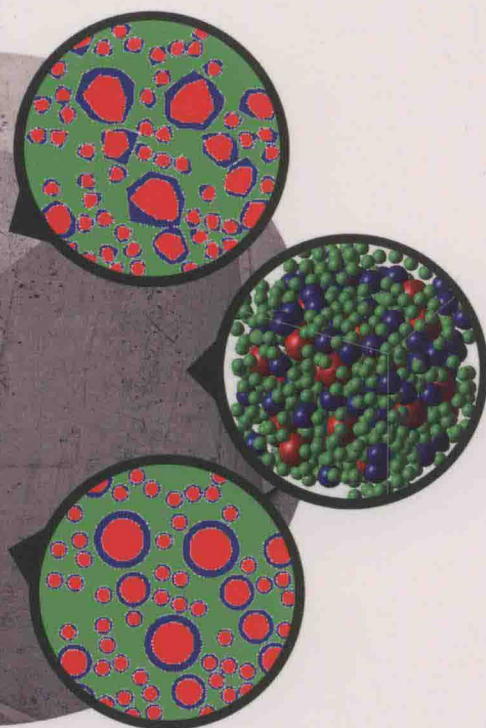


Meso-analysis Method for
Recycled Concrete

再生混凝土 细观分析方法

彭一江 应黎坪/著



科学出版社

再生混凝土细观分析方法

Meso-analysis Method for Recycled Concrete

彭一江 应黎坪 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

再生混凝土材料的细观结构与宏观力学性能关系问题是一项重要的工程与科学问题及学科前沿研究课题。本书内容围绕静、动态损伤问题的新型有限元法——基面力元法及再生混凝土材料细观损伤仿真模拟分析方法探索方面展开。

全书分三部分。第一部分包括第2章~第5章,介绍基于势能原理的基面力元法。第二部分包括第6章~第11章,研究再生混凝土细观损伤分析模型及模拟方法。第三部分包括第12章~第19章,数值仿真模拟再生混凝土材料细观结构与破坏机理。

本书可作为土木工程、水利工程、交通工程、材料科学与工程、工程力学等专业工程技术人员、教师和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

再生混凝土细观分析方法/彭一江,应黎坪著. —北京:科学出版社,2018.9
ISBN 978-7-03-058672-8

I. ①再… II. ①彭… ②应… III. ①再生混凝土-研究 IV. ①TU528.59

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 201290 号

责任编辑:刘信力/责任校对:邹慧卿
责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年9月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年9月第一次印刷 印张:14 1/4 插页:3

字数:267 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

再生骨料混凝土 (Recycled Aggregate Concrete, RAC) 简称再生混凝土 (Recycled Concrete), 是将废弃混凝土经过清洗、破碎、分级和按一定比例与级配混合形成再生骨料, 部分或者全部代替砂石等天然骨料配制成的新混凝土。它作为一种绿色环保型建筑材料已经得到广泛的重视。再生骨料混凝土技术可实现对废弃混凝土的再加工, 使其恢复原有的性能, 形成新的建材产品, 从而既能使有限的资源得以再利用, 又解决了部分环保问题。目前, 再生混凝土新技术是各国共同关心的课题, 已成为国内外工程界和学术界关注的热点和前沿问题之一。

在再生混凝土性能研究方面, 国内外学者展开了大量的试验研究, 并取得了大量的成果。目前再生混凝土的研究主要集中在基本性能的试验研究方面, 对再生混凝土这种复合材料的细观力学研究、分析工作尚未得到深入、系统的开展。对再生混凝土材料的细观力学分析方法, 以及静、动态损伤破坏机理、动态强度、多轴强度、本构关系及变形的研究工作还远远不够, 尚不能满足工程的需要, 工程界也迫切需要得到关于再生混凝土材料力学性能和机理分析方面的理论指导和分析手段。因此, 深入研究再生混凝土材料的细观静、动力学分析方法, 利用有效的数值分析手段, 从再生混凝土的细观结构入手, 构建再生混凝土细观静、动态力学分析模型, 考察再生混凝土各组分对再生混凝土静、动态力学性能的影响, 建立再生混凝土细观静、动态损伤理论, 从细观层次上分析再生混凝土的破坏机理是极具开拓性和挑战性的课题, 且具有较重要的理论意义及工程应用价值。

关于再生混凝土这种非均质复合材料的细观损伤分析方法及应用研究仍是目前混凝土理论研究的前沿课题。由于再生混凝土材料细观结构的复杂性, 数值模拟较为困难。目前, 国内外一些学者在这方面开展了系列研究工作。但是, 现有的研究工作以利用大型商业软件对试件进行计算分析居多。而对这一课题的研究, 尚缺少对再生混凝土材料细观结构进行精细化仿真模拟分析的高效计算方法、静态损伤分析模型、任意多边形随机骨料模型、三维随机骨料模拟生成软件、再生混凝土动态本构关系、静动态应力应变软化曲线、静动态多轴强度、静动态尺寸效应、静动态变形、高应变率影响以及静动态损伤破坏机理等科学问题的深入、系统研究。因此, 针对再生混凝土的细观力学分析方法、理论模型、数值模拟技术及软件研究工作与试验研究工作水平相比, 还较为落后, 需要进行深入、系统地研究和开发。

本书将基面力概念的新型有限元法——“基面力元法 (BFEM)”应用于再生混

混凝土材料的大规模科学计算和分析领域,结合再生混凝土材料的细观结构与宏观力学性能关系的分析方法课题,探索基面力元法在再生混凝土材料这种非均质复合材料破坏机理分析领域的应用,建立基于势能原理的再生混凝土细观静、动态损伤基面力元分析法,探索一种可用模拟再生混凝土细观静、动态损伤破坏过程的大规模和高效计算的数值分析方法。针对再生混凝土的细观损伤与宏观力学性能关系这一学科前沿课题开展深入系统研究,从理论上探索再生混凝土材料细观结构的细观力学分析方法,建立静态、动态损伤分析模型;利用数值模拟技术模拟再生混凝土的静、动态力学性能,从细观层次分析再生混凝土这种非均质复合材料的破坏机理,研究再生混凝土的本构关系,应力应变软化曲线,多轴强度、尺寸效应,以及再生混凝土的变形。通过数值分析结果与试验结果的对比分析,揭示再生混凝土的破坏机理,为我国未来再生混凝土建筑的设计开发提供理论基础和技术储备。

本书第一作者从 1997 年开始针对碾压混凝土的细观损伤断裂问题进行研究,利用随机骨料模型技术和有限元技术研究了碾压混凝土的静力特性、裂纹扩展过程、尺寸效应的影响等。2003 年后主要针对普通混凝土材料的标准试件和标准试样的平面静力、平面动力问题进行细观损伤分析,特别是在普通混凝土试件的单轴拉伸试验的静、动态仿真模拟、均匀化处理方法的探讨、混凝土材料软化曲线、三角形循环加载的模拟等问题的科学研究方面取得了一些成果。近年来,本课题组重点在新型有限元方法——基面力元法的理论、软件研究及其在再生混凝土材料的细观损伤分析方法及应用方面开展系统的研究工作,取得了一些成果。

本书是作者对近年来基面力元法的理论及其在再生混凝土材料的细观损伤分析方法研究成果的总结。第一部分介绍基于势能原理的基面力元法;第二部分研究再生混凝土细观损伤分析模型及模拟方法;第三部分数值仿真模拟再生混凝土材料细观结构与破坏机理,包括二维随机圆骨料试件单轴拉压破坏机理静态模拟、二维随机凸骨料试件破坏机理静态模拟、基于数字图像技术的再生混凝土破坏机理静态模拟、三维随机球骨料试件单轴拉压破坏机理静态模拟、基于细观等效模型的再生混凝土数值模拟、再生混凝土动态性能的细观损伤分析、细观力学参数对数值模拟结果的影响、细观力学参数非均质性的影响分析等。

本书前期理论模型研究工作是在北京交通大学高玉臣院士的悉心指导下完成的,值此本书出版之际,谨向逝去的高先生致以深深的谢意和由衷的敬意!本书前期有限元数值模拟方法研究工作得到了北京工业大学黎保琨教授的精心指导和热心帮助,在此表示衷心的感谢!

近年来,一些研究生在本书第一作者指导下参加了对基面力元法理论体系及其工程应用的研究工作,本书引用了他们的研究成果,在此特别要感谢:应黎坪、王耀、浦继伟、党娜娜、褚昊、窦林瑞、倪俊华、周化平、孙占青、崔云璇、杨欣欣、孟德泉、王晴、陈曦昀、李超群、吴正昊、杨德思、杨宏明等同学对本书作出的贡

献。其中,本书第二作者应黎坪博士负责对本书所用计算程序进行了全面检查、完善、改编和升级,对全书的书稿进行了补充、修改和完善。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(编号:11172015)和北京市自然科学基金(编号:8162008)的资助,在此表示衷心的感谢!还要感谢北京工业大学土木工程学科的大力支持。在本书的研究和写作过程中,本课题组广泛阅读、学习、利用和借鉴了许多国内外同行的研究成果,在此表示诚挚的感谢!

本书仅是本课题组有关再生混凝土材料的细观损伤分析方法阶段性研究成果的介绍,旨在抛砖引玉,后续深入的研究工作还需不断完善、深化和发展。也希望有志于探索再生混凝土材料的细观损伤分析方法的科研人员和研究生投身到该学科前沿课题的研发和应用中来,互相学习、互相促进,以拓展再生混凝土材料的细观损伤分析方法的工程应用。由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者提出宝贵意见。

作 者

2018 年 4 月于北京

主要符号

$x^i (i = 1, 2, 3)$	物质点的 Lagrange 坐标
P, Q	变形前后物质点的径矢
P_i, Q_i	变形前后的协变基矢量
P^i, Q^i	变形前后的逆变基矢量
$T^i (i = 1, 2, 3)$	坐标系 x^i 中 Q 点的基面力
V_P, V_Q	变形前后的基容
A^i	基面积
σ	Cauchy 应力张量
u_i	位移梯度
ρ_0, ρ	变形前和变形后的物质密度
W	应变能密度
A	单元的面积
V	单元的体积
K^{IJ}	单元刚度矩阵
M^{IJ}	单元质量矩阵
C^{IJ}	单元阻尼矩阵
U	单位张量
E	弹性模量
ν	泊松比
D	材料损伤因子
f	材料强度
f_d	材料动态强度
ε	单元主应变
λ	拉梅常数
G	剪切模量
m	材料均质度

目 录

前言

主要符号

第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景及意义	1
1.2 混凝土细观力学分析方法简介	2
1.2.1 混凝土细观力学研究方法	3
1.2.2 再生混凝土细观力学试验研究简介	3
1.2.3 混凝土细观结构数值模拟研究简介	4
1.3 再生混凝土材料力学性能的动态效应简介	7
1.4 基面力元法研究现状	9
1.5 本书的主要内容	9

第一部分 基于势能原理的基面力元法

第 2 章 基面力基本理论简介	13
2.1 基面力	13
2.2 基面力与应力张量关系表达式	15
2.3 基面力对偶量	15
2.4 基面力理论基本方程	16
2.4.1 基面力表示的平衡方程	16
2.4.2 位移梯度表示的几何方程	16
2.4.3 基面力表示的物理方程	16
2.4.4 基面力表示的边界条件	17
2.5 本章小结	17
第 3 章 基于势能原理的二维基面力元法	18
3.1 基面力元法的基本方程	18
3.2 三角形基面力元模型	19
3.3 势能原理基面力元法主程序流程图	24
3.4 势能原理基面力元模型的正确性验证	25
3.5 本章小结	30

第 4 章 基于势能原理的三维基面力元法	31
4.1 基面力表示空间问题的基本公式	31
4.2 空间四节点四面体基面力元模型	31
4.2.1 三维空间单元的应变	32
4.2.2 三维空间单元的刚度矩阵	34
4.3 空间问题主应力及计算公式	36
4.4 三维基面力元法主程序开发	37
4.4.1 三维基面力元法程序说明	37
4.4.2 三维基面力元法程序流程图	38
4.5 三维基面力元模型正确性验证	38
4.6 本章小结	41
第 5 章 动力问题的基面力元法	42
5.1 质量矩阵和阻尼矩阵	42
5.1.1 质量矩阵	42
5.1.2 阻尼矩阵	43
5.2 动力方程的求解	43
5.3 本章小结	45
 第二部分 再生混凝土细观损伤分析模型及模拟方法	
第 6 章 再生混凝土二维随机骨料模型	49
6.1 再生混凝土二维随机圆骨料模型	49
6.1.1 再生骨料颗粒数与级配	49
6.1.2 再生骨料老砂浆层厚度	51
6.1.3 再生骨料的分布	51
6.2 再生混凝土二维随机凸多边形骨料模型	54
6.2.1 生成随机多边形基骨料的生成	55
6.2.2 随机多边形延展条件和方式	56
6.2.3 流程框图	58
6.3 有限元网格剖分及单元属性确定	60
6.3.1 网格自动剖分方法	60
6.3.2 单元属性的确定	61
6.4 本章小结	61
第 7 章 再生混凝土三维随机球骨料模型	63
7.1 再生混凝土三维随机骨料模型	63

7.1.1	蒙特卡罗随机方法	63
7.1.2	富勒颗粒级配理论	64
7.1.3	骨料颗粒数及混凝土级配	64
7.1.4	再生骨料老砂浆层厚度	65
7.1.5	骨料球心坐标的确定	66
7.1.6	骨料随机投放模型	67
7.2	空间有限元模型及单元属性判别	67
7.2.1	空间网格剖分方法	68
7.2.2	单元属性判别	68
7.3	再生混凝土模型生成流程图	70
7.4	本章小结	71
第 8 章	基于数字图像技术的再生混凝土细观模型	72
8.1	图像分段变换	72
8.2	滤波除噪	73
8.3	边界处理	74
8.4	本章小结	75
第 9 章	再生混凝土材料本构损伤模型	76
9.1	双折线损伤本构模型	76
9.2	多折线损伤本构模型	77
9.3	分段曲线损伤本构模型	78
9.4	多轴损伤本构关系	80
9.5	本章小结	81
第 10 章	再生混凝土的细观等效化模型	82
10.1	再生混凝土圆骨料复合球等效模型	82
10.1.1	泊松比的等效	82
10.1.2	弹性模量的等效	83
10.1.3	强度的等效	85
10.2	细观等效化模型	86
10.2.1	Voigt 并联弹模等效模型及 Reuss 串联弹模等效模型	86
10.2.2	基于 Voigt 并联和 Reuss 串联方法的细观等效损伤本构模型	89
10.2.3	细观等效化模型的网格划分	91
10.2.4	细观等效化模型计算程序流程图	91
10.3	本章小结	93
第 11 章	损伤问题非线性基面力元求解模型	94
11.1	直接迭代法	94

11.2	收敛准则	95
11.3	非线性基面力元法程序	96
11.4	非线性基面力元法程序验证	98
11.5	本章小结	99

第三部分 数值仿真模拟再生混凝土材料细观结构与破坏机理

第 12 章	二维随机圆骨料试件单轴拉压破坏机理静态模拟	103
12.1	再生混凝土随机圆骨料试件单轴压缩数值模拟	103
12.1.1	150mm×150mm×150mm 试件单轴压缩数值试验	104
12.1.2	其他试件单轴压缩数值试验	106
12.2	再生混凝土随机圆骨料单轴拉伸数值模拟	109
12.2.1	150mm×150mm×150mm 试件单轴拉伸数值试验	109
12.2.2	其他试件单轴拉伸数值试验	111
12.2.3	多轴损伤本构关系的探讨	113
12.3	本章小结	114
第 13 章	二维随机凸骨料试件破坏机理静态模拟	115
13.1	再生混凝土随机凸多边形骨料试件单轴压缩数值模拟	115
13.1.1	150mm×150mm×150mm 试件单轴压缩数值试验	115
13.1.2	其他试件单轴压缩数值试验	118
13.2	再生混凝土随机凸多边形骨料试件单轴拉伸数值模拟	120
13.2.1	150mm×150mm×150mm 试件单轴拉伸数值试验	121
13.2.2	其他试件单轴拉伸数值试验	122
13.3	再生混凝土棱柱体抗压试验数值模拟	124
13.4	再生混凝土梁抗弯试验数值模拟	126
13.5	本章小结	128
第 14 章	基于数字图像技术的再生混凝土破坏机理静态模拟	129
14.1	加载模型及参数的确定	129
14.2	真实细观模型力学分析	130
14.3	不同骨料形式的影响	133
14.4	本章小结	134
第 15 章	三维随机球骨料试件单轴拉压破坏机理静态模拟	135
15.1	三维试件单轴压缩数值模拟	135
15.1.1	100mm×100mm×100mm 立方体试件单轴压缩	135
15.1.2	150mm×150mm×150mm 立方体试件单轴压缩对比	139

15.1.3 立方体试件不同边界条件结果对比	141
15.2 三维试件单轴拉伸数值模拟	143
15.2.1 100mm×100mm×100mm 立方体试件单轴拉伸	143
15.2.2 150mm×150mm×150mm 立方体试件单轴拉伸对比	146
15.3 本章小结	147
第 16 章 基于细观等效模型的再生混凝土数值模拟	148
16.1 基于细观等效模型的再生混凝土试件单轴受力的数值模拟	148
16.2 再生混凝土拉剪混合破坏 L 型板试验数值模拟	154
16.3 本章小结	156
第 17 章 再生混凝土动态性能的细观损伤分析	157
17.1 单轴动态拉伸试验数值模拟	157
17.1.1 加载模型	157
17.1.2 动态拉伸应力-应变曲线	159
17.1.3 抗拉动力增强系数 DIF	160
17.1.4 动态拉伸破坏形态	161
17.1.5 破坏过程	162
17.2 单轴动态压缩试验数值模拟	163
17.2.1 加载模型	163
17.2.2 动态压缩应力-应变曲线	163
17.2.3 动力增强系数 DIF	165
17.2.4 破坏形态	166
17.2.5 破坏过程	167
17.3 拉剪混合破坏 L 型板动态破坏模式分析	168
17.3.1 计算模型的建立	168
17.3.2 数值结果及讨论	168
17.4 再生混凝土梁抗弯动态破坏模式分析	172
17.4.1 计算模型的建立	172
17.4.2 试件破坏过程	173
17.4.3 试件应力变化	175
17.5 本章小结	177
第 18 章 细观力学参数对数值模拟结果的影响	179
18.1 天然骨料的影响	179
18.1.1 弹性模量	179
18.1.2 强度	180
18.2 新砂浆的影响	182

18.2.1 弹性模量	182
18.2.2 强度	183
18.3 老砂浆的影响	185
18.3.1 弹性模量	185
18.3.2 强度	186
18.4 新粘结界面过渡区的影响	187
18.5 老粘结界面过渡区的影响	189
18.6 本章小结	190
第 19 章 细观力学参数非均质性的影响分析	191
19.1 Weibull 概率统计分布	191
19.2 单轴载荷作用下的立方体试件数值试验	194
19.3 三点弯曲切口梁试验	195
19.4 本章小结	199
前景展望	200
参考文献	201
彩图	

第1章 绪 论

1.1 课题背景及意义

再生骨料混凝土 (Recycled Aggregate Concrete, RAC) 简称再生混凝土 (Recycled Concrete), 是将废弃混凝土经过清洗、破碎、分级和按一定比例与级配混合形成再生骨料, 部分或者全部代替砂石等天然骨料配制成的新混凝土。它作为一种绿色环保型建筑材料已经得到广泛的重视^[1-5]。我国政府制定的中长期科技兴国战略和社会可持续发展战略, 鼓励废弃物再生技术的研究和应用。再生骨料混凝土技术可实现对废弃混凝土的再加工, 使其恢复原有的性能, 形成新的建材产品, 从而既能使有限的资源得以再利用, 又解决了部分环保问题^[6]。这是发展绿色混凝土, 实现建筑资源环境可持续发展的主要措施之一。美国、日本和欧洲的发达国家对废弃混凝土的再利用研究的较早^[7], 主要集中在对再生骨料和再生混凝土基本性能的研究, 已有成功应用于刚性路面和建筑结构物的例子。我国于 20 世纪 90 年代才开始对废弃混凝土再生利用进行初步探讨, 研究基础比较薄弱, 起初政府对废弃混凝土的回收利用重视度也不高。直到 1997 年建设部将“建筑废渣综合利用”列入科技成果重点推广项目, 国内数十家大学和研究机构的一些专家、学者才掀起对废弃混凝土再生利用进行研究的热潮。目前, 再生混凝土新技术是各国共同关心的课题, 已成为国内外工程界和学术界关注的热点和前沿问题之一^[8]。

在再生混凝土性能研究方面, 国内外学者对其展开了大量的试验研究, 并取得了初步的成果。目前再生混凝土的研究主要集中在基本性能的试验研究方面, 对再生混凝土材料的细观力学研究、分析工作尚未得到深入、系统地开展, 对再生混凝土材料的细观力学分析方法, 以及静动态损伤破坏机理、动态强度、多轴强度、本构关系及变形的研究工作还远远不够, 不能满足工程的需要, 工程界也迫切需要关于再生混凝土材料力学性能和机理分析方面的理论指导和分析手段。因此, 深入研究再生混凝土材料的细观静、动力学分析方法, 利用有效的数值分析手段, 从再生混凝土的细观结构入手, 构建再生混凝土细观静动态力学分析模型, 考察再生混凝土各组分对再生混凝土静动态力学性能的影响, 建立再生混凝土细观静态损伤理论, 从细观层次上分析再生混凝土的破坏机理是极具开拓性和挑战性的课题, 具有重要的理论意义及工程应用价值。

1.2 混凝土细观力学分析方法简介

混凝土是由水泥、粗细骨料和水组成的复合材料。混凝土破坏问题的研究根据材料的内部结构可划分为不同层次的描述方法,一般从研究方法和特征尺寸的侧重点将混凝土的内部结构分为三个层次,即宏观层次、细观层次和微观层次,见图 1.1。Wittmann^[9,10]采用宏、细、微观三尺度相结合的方法研究混凝土材料的力学行为特征,取得了丰富的成果。

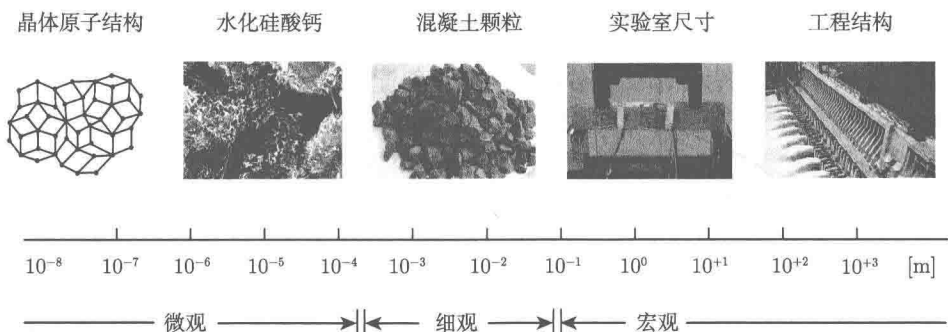


图 1.1 混凝土的层次结构示意图

宏观尺度又叫工程结构尺度,混凝土材料被视为由尺寸数倍于最大骨料粒径的结构单元组成,该尺度的研究无法揭示混凝土内部结构、组成与力学性能之间的关系,但是毕竟反应了一种工程平均,是工程设计所必须的。

在细观尺度上,包含的单元尺寸范围从 10^{-4} cm 到几个 cm,甚至更大一些,混凝土可看做是骨料、水泥砂浆与其交界面(过渡区)组成的三相复合材料,由泌水、干缩和温度变化等因素引起的骨料和水泥砂浆之间的非均匀变形,会形成初始粘结裂纹等细观缺陷,因此,混凝土在细观层次为典型的非均质材料。这些细观缺陷的发展直接影响到混凝土的宏观力学性能。

微观尺度一般指微米尺度,着眼于水泥水化物的微观结构分析,材料性能的理论分析是根据统计力学的方法,是水泥化学研究的范畴。

混凝土的成分在不同的尺度上有不同的物理意义,而且不具备自相似性,因此,混凝土的破坏问题、特别是破坏机理的研究需要在多种尺度下进行。多尺度分析方法考虑空间和时间的跨尺度与跨层次的材料力学特性,构成了联系宏观、细观、微观等多尺度的桥梁,尽管任务的要求是从最高层面提出来的,失效却起源于最底层;从材料的角度分析,材料本身也可以在多尺度下进行研究,一般认为该尺度下材料表现的力学性质可以借助于更低一层次尺度下的材料结构和材料性质加以解释。混凝土在细观上为多相介质组成的复合材料,材料的破坏过程实质上是内

部微裂纹萌生、扩展、贯通,直至宏观裂纹产生导致混凝土失稳破坏的过程,受力过程中所表现的非线性力学行为,是混凝土非均质的细观结构及其特性的损伤演化过程的宏观表现。因此,研究细观层次材料的损伤行为,对揭示混凝土破坏过程的宏观非线性力学行为具有重要的意义。

1.2.1 混凝土细观力学研究方法

自 20 世纪 70 年代末,学者开始采用混凝土细观力学研究方法来建立混凝土细观结构各种缺陷和其特性的不均匀性及其在宏观力学特性的关系。细观力学将混凝土看做是由骨料、硬化水泥胶体和它们两者之间的界面连接带组成的三相非均质复合材料。选择适当的混凝土细观结构模型并划分单元,考虑骨料单元、固化水泥砂浆单元与界面单元材料力学的不同特性,及简单的破坏准则,利用数值模拟方法计算混凝土试件的裂缝扩展过程和最终破坏形态,直观地反映出混凝土试件的损伤断裂破坏机理。由于细观上损伤单元刚度的退化,使得试件变形与所受荷载之间的关系表现为非线性。

混凝土细观力学的研究是将试验、理论分析和数值计算三方面相结合而成。试验观测结果提供了判断标准及细观力学的实物物性数据检验;理论研究总结出细观力学的基本原理及理论模型;数值模拟计算是细观力学不可或缺的研究手段。当前混凝土细观力学数值模拟主要沿着两个方向进行:

(1) 将损伤力学、连续介质力学以及计算力学相结合去研究细观尺度的变形、损伤及破坏过程,以发展较精确的细观本构关系;

(2) 基于对细观结构与细观本构关系的认识,将随机分析等理论方法与计算力学相结合去预测材料的本构关系及宏观性质,对混凝土试件的宏观响应进行计算模拟。

1.2.2 再生混凝土细观力学试验研究简介

从 20 世纪 70 年代末开始,德国、日本、荷兰和美国等发达国家在再生混凝土开发方面的发展速度很快,取得了一系列的成果并积极将其推广应用于实际工程中。其研究早已成为发达国家的共同课题。早在 20 世纪 80 年代,Henrichsen 和 Jensen^[11]就对再生混凝土应力-应变全曲线进行了试验研究,并与普通混凝土对比。Hansen^[6,7]等较早开始再生混凝土的研究,并认为再生骨料混凝土的抗压强度低于基体混凝土或相同配制的普通混凝土的强度,降低范围为 5%~30%,平均降低 15%;其后各国学者纷纷展开对再生混凝土的研究工作。如,1997 年 Topcu^[12]通过试验对比了不同再生粗骨料取代率下的再生混凝土的单轴受压应力-应变曲线,发现随着再生粗骨料的增加,再生混凝土的抗压强度和弹性模量降低。Poon^[13]等比较了再生混凝土与普通混凝土的界面结构,发现再生粗骨料与

砂浆的界面处呈现多孔的特征。Otsnki 等^[14]的研究发现,在低水灰比的时候,再生粗骨料混凝土的抗压强度和抗拉强度比普通混凝土低。Gerardu 等^[15]研究表明,相同条件下再生混凝土的徐变应变比普通混凝土大 40%;再生混凝土的弹性模量较普通混凝土的最多降低 15%。Klischewicz 等^[16]研究了用强度等级为 C35-C70 的再生集料配制的混凝土的各项性能,并提出高性能混凝土的概念。Mandal 和 Gupta^[17]的试验结果发现再生混凝土各龄期的抗折强度均低于普通混凝土,平均降低幅度为 12%。Tam 等^[18]对用两次混合法配制的再生混凝土进行了微观分析,指出再生混凝土的质量通过两次加料法可以大大改善其工作性能。澳大利亚的 Sago-Crentsil^[19]对用再生粗集料配制的混凝土的性能进行了研究。

近年来,国内一些专家学者在废混凝土利用方面进行了一些基础性的试验研究,取得了一定的研究成果。其中同济大学肖建庄等^[20]利用细微观试验,形貌观察和计算机分析等手段,综合分析了再生混凝土力学性能的本质影响因素和破坏机理;华北水利水电学院邢振贤等^[21]对再生混凝土基本性能进行了研究;东南大学材料科学与工程系的张亚梅等^[22]对再生混凝土配合比设计进行了初探。

由于再生混凝土的力学性能及破坏机理与其微观结构密切相关,利用数值分析手段进行再生混凝土的静、动态损伤破坏机理分析,并与试验结果相互验证,此种分析方法是研究再生混凝土力学性能及破坏机理的主要方向。

1.2.3 混凝土细观结构数值模拟研究简介

由于试验条件的限制,往往混凝土力学试验结果不能全部反映试件的材料特性。随着细观力学理论的发展和高速度大容量电子计算机的出现,为数值模拟再生混凝土的力学性能及破坏机理提供了一种新的分析途径。细观力学数值模拟可以取代部分试验,可得到试验手段无法分析的细观损伤及破坏机理。用计算机模拟和预测材料的破坏过程已成为混凝土力学的热点。20 世纪 90 年代,以基本试验数据和静动力学理论为基础,用数值方法模拟混凝土细观结构裂纹产生、扩展及与宏观力学性能相关的细观力学已经发展成为的主要研究方向之一。混凝土细观层次上是由粗、细骨料、水泥水化产物、未水化水泥颗粒、孔隙、裂缝等所组成的连续不匀质多相复合材料。为了对各相材料的力学性质进行细观力学数值模拟,人们提出了许多研究混凝土断裂过程的细观力学模型,最具典型的主要有以下几种。

1. 格构模型

在细观尺度上,格构模型将连续介质离散成由弹性杆或梁单元连结而成的格构系统,每个单元代表材料的一小部分(如岩石、混凝土的固体基质)。单元采用简单的本构关系(如弹脆性本构关系)和破坏准则,并考虑骨料分布及各相力学特性分布的随机性。Schlangen 等^[23-25]将格构模型应用于混凝土断裂破坏研究,模拟