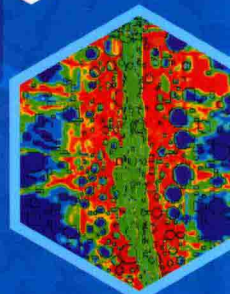
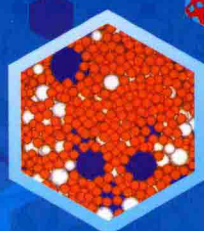
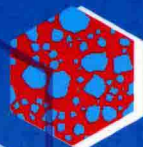
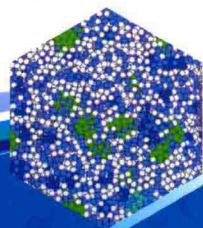
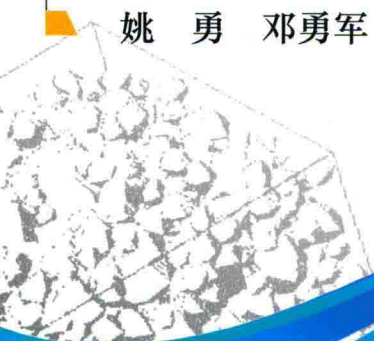


非均质多相脆性材料的

动力学特性 与数值建模技术

姚 勇 邓勇军 刘筱玲/著



科学出版社

非均质多相脆性材料的动力学 特性与数值建模技术

姚 勇 邓勇军 刘筱玲 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要以机场跑道、公路等重要目标中的卵石层介质为对象,对典型的非均质多相脆性材料在冲击荷载作用下的动力特性及数值建模技术进行了研究。全书共分为8章:第1章介绍了研究背景及研究现状;第2章以混凝土材料为例,介绍了非均质多相脆性材料的数值几何建模方法;第3章是混凝土本构模型选择及参数获取方法;第4章是界面参数对靶板侵彻过程的影响;第5章是基于细观参数对弹体侵彻混凝土靶的弹道偏转的分析;第6章以砂卵石土为例,介绍了基于离散元法的建模方法;第7章是砂卵石土本构模型的选取及细观参数的获取;第8章是基于离散元法的砂卵石土侵彻效应分析。

本书可供从事非均质材料动态力学性能研究的科研人员使用,也可作为高等院校力学专业研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

非均质多相脆性材料的动力学特性与数值建模技术 / 姚勇, 邓勇军, 刘筱玲著. —北京: 科学出版社, 2018.12

ISBN 978-7-03-060130-8

I. ①非… II. ①姚… ②邓… ③刘… III. ①功能材料-动力特性-系统建模-研究 IV. ①TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 290236 号

责任编辑: 张 展 孟 锐 / 责任校对: 王 翔

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

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>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 12 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 12 月第一次印刷 印张: 11 1/2

字数: 260 000

定价: 79.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

自然界中常见的岩石、砂卵石，人工合成的混凝土、水泥砂浆、陶瓷等材料都具有细观非均匀性，由颗粒相、黏结相及二者之间的界面等多相组成，抗拉强度远小于其抗压强度，材料具有脆性性质，这类材料被称为非均质多相脆性材料。该类材料广泛应用于交通工程、信息工程、防护工程等工程结构，在战争时将成为重点打击目标。该类工程结构及其材料的动态力学特性是影响弹体对攻击目标侵爆毁伤效果的决定因素之一。按照现有施工规范《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2005)及《军用机场场道工程施工及验收规范》(GJB1112A—2004)的规定，机场跑道、公路通常是由面层、基层、底层等构成。面层一般采用混凝土材料；基层多采用卵石层介质如级配砾石(卵石)、级配碎石，也有在其中掺加适量水泥、石灰等胶结材料；底层一般由夯实的地基土构成。卵石层介质作为典型的基层材料，具有脆性、多相、非均质等材料特性，对其在冲击荷载作用下的动力特性及数值建模技术进行研究，不仅可为以卵石层介质为基层材料的机场跑道、公路等典型目标的毁伤评估提供依据，而且对武器战斗部的研究、设计改进具有重要意义，同时可为非均质多相脆性类材料在冲击载荷作用下的相关研究奠定基础。

本书内容主要来源于国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院的联合基金项目“非均质多相脆性材料的动力学特性与数值建模技术”的相关研究成果。结合水泥胶结材料的掺量实验并考虑工程应用情况，将卵石层介质分为两类进行研究：水泥胶结材料的掺量小于4%时，作为砂卵石土材料；水泥胶结材料的掺量大于4%时，作为低标号混凝土材料。构建基于卵石颗粒级配的离散元多面体颗粒模型和基于随机骨料模型的有限元数值建模技术，进行本构模型和破坏准则的参数辨识，探索砂卵石土材料的侵彻实验方法。

感谢中国工程物理研究院总体工程研究所陈裕泽研究员、刘彤研究员、梅军研究员、郝志明研究员、张方举研究员、徐伟芳副研究员等对课题研究的指导和支持；感谢北京理工大学陈小伟教授对课题研究的指导和建议；感谢西南科技大学土木工程与建筑学院王汝恒教授、陶俊林教授、贾彬教授、陈代果老师、彭芸老师和富裕老师对课题的协助；感谢参与课题的西南科技大学土木工程与建筑学院研究生曾毅、吴东旭、赵睿、夏晓宁、徐刚、杨涛、牛振坤、孙加超、陈辉、刘佳洛、屈科佛、芮雪等为本书所做的大量工作。

鉴于作者的水平及认识的局限性，书中如有不妥之处，望读者批评指正。

目 录

第 1 章 背景及概述	1
参考文献	3
第 2 章 非均质多相材料数值几何建模方法	5
2.1 混凝土细观力学模型研究现状	5
2.2 随机骨料模型投放算法流程	9
2.2.1 随机数的生成	9
2.2.2 骨料级配、粒径和投放区域的确定	9
2.2.3 骨料投放算法及入侵判定	10
2.2.4 随机骨料模型投放算法流程图	14
2.2.5 随机凸多边形骨料模型的生成	15
2.2.6 随机骨料模型网格划分	16
参考文献	20
第 3 章 混凝土本构模型选择及参数获取	22
3.1 靶板材料模型	22
3.1.1 K&C 模型	22
3.1.2 HJC 模型	25
3.1.3 单元的尺寸效应影响分析	26
3.1.4 模型有效性验证	29
3.2 两种材料模型数值模拟对比分析	40
3.2.1 分析工况	40
3.2.2 计算结果分析	41
3.3 本章小结	44
参考文献	44
第 4 章 界面参数对靶板侵彻过程的影响	46
4.1 界面处理方法	46
4.1.1 计算工况	46
4.1.2 计算结果分析	48
4.2 界面参数对侵彻的影响	54
4.2.1 M-ITZ 界面参数	54
4.2.2 M-CON 界面参数	57

4.3 本章小结	59
参考文献	59
第5章 基于细观模型的刚性弹正侵彻混凝土靶的弹道偏转分析	61
5.1 均质模型与细观模型对比	62
5.1.1 数值模拟靶板尺寸	62
5.1.2 刚性弹正侵彻偏转影响因素分析	63
5.2 混凝土/弹体参数对偏转影响分析	67
5.2.1 数值实验设计	67
5.2.2 计算方案和材料参数	68
5.2.3 数值计算结果与分析	70
5.2.4 弹径/骨料粒径比和侵彻速度对正侵彻弹体偏转角度的影响分析	83
5.2.5 长径比对刚性弹正侵彻混凝土弹道偏转的影响分析	85
5.2.6 弹头形状对弹体正侵彻细观混凝土弹道偏转的影响分析	86
5.3 本章小结	89
参考文献	89
第6章 砂卵石土几何模型构建	91
6.1 随机颗粒模型的建立	91
6.1.1 半径膨胀法	92
6.1.2 随机球形颗粒模型的建立	93
6.1.3 随机多面体颗粒模型的建立	97
6.1.4 随机多面体颗粒模型中级配的修正	101
6.2 本章小结	104
参考文献	104
第7章 砂卵石土本构模型的选取及细观参数的获取	105
7.1 砂卵石土本构模型	105
7.2 砂卵石土细观力学参数的获取方法	108
7.2.1 砂卵石土室内直剪实验	108
7.2.2 砂卵石土原位拉拔实验方法	112
7.2.3 砂卵石土直剪实验数值模拟的建立及初始条件的定义	116
7.2.4 直剪实验数值模拟结果分析	118
7.2.5 砂卵石细观力学参数的标定过程	124
7.3 砂卵石土细观力学参数的适用性验证	128
7.4 本章小结	129
参考文献	130

第 8 章 基于离散元法砂卵石土侵彻效应分析	132
8.1 离散元法侵彻模型和算法的有效性验证	132
8.1.1 Hanchak 侵彻实验简介	132
8.1.2 离散元法中混凝土细观参数的取值	133
8.1.3 Hanchak 侵彻混凝土靶板颗粒离散元法分析	135
8.2 砂卵石土侵彻实验	137
8.2.1 砂卵石土级配	137
8.2.2 靶体边界设计	137
8.2.3 试件尺寸设计	138
8.2.4 砂卵石侵彻实验工况设计	138
8.2.5 实验结果	139
8.3 砂卵石土侵彻数值模拟分析	147
8.3.1 砂卵石土侵彻数值模型的建立	147
8.3.2 砂卵石土侵彻数值模拟分析	149
8.3.3 砂卵石土颗粒级配对侵彻特性的影响	153
8.3.4 砂卵石土内部微压对侵彻特性的影响	160
8.4 本章小结	163
参考文献	163
彩图	165

第1章 背景及概述

从严格意义上来说,由于在形成或加工过程中存在各种随机的影响因素,对于任何人工的或天然的材料,其物理性质的空间分布都不是均匀的,只不过彼此的非均匀程度不同而已。自然界中常见的岩石、砂卵石,人工合成的混凝土、水泥砂浆、陶瓷等材料都具有细观非均匀性,且这类材料通常有三个明显的特征:

①多相:材料不是由同一种介质构成的,而是由多个类型不同的组分构成的;②非均质:组成材料的各相组分材料特性相差较大,复合而成的材料物理及力学特性在宏观上表现出不均匀性的特点;③脆性:各相组分均为脆性材料,其破坏特征表现为断裂的突发性,在裂缝扩展前,一般不存在明显的裂纹尖端塑性区。由于该类材料内部各种微结构的存在和相互作用,在冲击荷载作用下的动力学特性十分复杂,采用传统的均匀模型来分析材料中微结构的影响已不再合适,从而使理论分析十分困难。另外,由于非均匀材料中各个组分差异、试件的非均匀性不同,实验结果受离散性和试件尺寸效应等的影响较大,只有进行大量的重复实验才能得到有意义的结果,这是一个颇费人力和资金的过程。随着计算力学的发展和计算机性能的提高,数值计算方法逐渐成为研究该类材料的重要方法,而在数值计算中,研究该类材料最首要的问题是如何构建其几何模型及物理模型,从而从真实意义上反映材料内部结构组成对宏观力学性能的影响。卵石层介质作为典型的基层材料,具有脆性、多相、非均质等材料特性,广泛应用于各个领域,是工程结构(如高坝、桥梁、核电站、机场跑道、公路及其他防护工程等基础设施建设)中重要的组成部分,对其在冲击荷载作用下的动力特性及数值建模技术进行研究,可以为非均质多相脆性类材料在冲击荷载作用下的相关研究奠定基础。

卵石层介质在深层高速侵彻条件下,其多相、非均匀性对弹体的弹道、侵彻深度、毁伤效果等的影响相对于其主要参量而言可以简化,可以将卵石层看作连续均匀的材料,采用连续介质模型借鉴混凝土的本构模型及参数进行高压高应变率的模拟计算^[1-4]。在低速侵彻条件下,卵石层介质的多相非均匀性将影响弹体的弹道偏转、弹体弯曲、靶体的毁伤效果等,在此条件下能否将卵石层介质作为连续均匀介质建模,以及其骨料分布的不均性、颗粒的尺寸效应与界面特性对卵石层冲击破坏的影响机理还未有明确认识。

不加入胶结材料的卵石层介质可视为散体介质——砂卵石土。对于砂卵石土的研究主要集中在静载或低频振动条件下。国内的肖伦斌等^[5]、张玲玲等^[6]

进行了砂卵石土静力实验, 分析了其静力力学特性; 吴怀忠等^[7]、王汝恒等^[8]、贾彬等^[9]针对砂卵石土采用室内动三轴实验分析了不同围压、不同固结比和不同振动频率对其准静态响应影响的变化规律, 归纳出动弹性模量随着固结比的增大而增大, 阻尼比具有随动应变增大而增大等结论。目前应用比较广泛的土的宏观本构模型主要有邓肯 E- ν 模型、E-B 模型、K-G 模型、椭圆-抛物双屈服面模型等非线性弹性模型和弹塑性模型^[10-12], 这些模型主要适用于静态荷载下的细粒土的材料力学性能研究与工程数值计算分析, 建立在宏观均匀连续介质的假定基础上, 无法反映土的细观组成对其材料特性的影响, 特别是动载条件下在描述变形及动力特征方面有明显不足。材料的宏观性能由其细观特性决定, 为反映细观特性对材料宏观性能的影响, 近年来, 大量构建材料性能宏细观框架的研究不断涌现。不同的学者^[13-17]以土的细观接触关系为基础, 研究颗粒的相对运动规律及其细观本构关系, 并将其与宏观连续介质模型相联系, 发展了新的连续介质本构关系。这些研究是以细粒土为对象, 土颗粒的尺寸效应未能全面反映。

砂卵石土中的卵石颗粒作为一种脆性材料, 其材料特性与其他岩石、陶瓷等脆性材料相似, 拉伸损伤累积是导致脆性材料动态断裂的主要原因, 大多采用拉伸破坏准则^[18, 19]作为损伤判据。但是由于卵石层介质中卵石颗粒级配不同, 颗粒尺寸及分布具有随机性, 造成卵石层介质具有非均匀性, 连续介质的宏观弹塑性模型在模拟其受到冲击作用时的宏观破坏现象时不再适用。砂卵石土的松散特性可采用离散元法进行模拟。离散元法基于牛顿运动定律, 在散体介质中广泛应用。也有学者基于离散元法进行连续的材料冲击动力学特性分析, 但离散元方法与有限元计算相比, 计算工作量较大, 物理机理假定较多。大量的离散元法的应用集中在岩土介质的物理力学性能研究, 以及滑坡、崩塌、泥石流等自然灾害的机理研究方面^[20, 21]。基于 Cundall 模型的刚性颗粒模型, 已有较成熟的商业软件 PFC 在岩土工程中广泛使用, 土中固体颗粒的相互作用采用接触-滑移算法, 土的黏聚力借用连续介质中的阻尼作用, 并用平行连接强度模拟土的破坏极限, 能很好地解决土体的大部分工程力学问题。

添加胶结材料的卵石层介质可以被视为一种低标号的混凝土, 而国内外已开展了大量的混凝土在冲击载荷作用下的动态响应^[22, 23]分析, 用于数值模拟冲击问题的混凝土本构模型很多, 如 JHC 模型、Forrestal 模型、RHT 模型、Malvar 模型等^[24, 25]。这些模型基于宏观材料的均匀性假定, 不能捕捉混凝土局部破坏的随机性和材料的细观非均质性, 因此在考虑混凝土的应变率效应、材料的不均匀性及界面特性等对材料的冲击动力学特性的影响方面有待研究改进。同时, 随着大容量高速计算机的出现, 基于混凝土细观层次上的数值模拟成为可能, 越来越多的研究者^[26-32]采用细观力学的方法研究混凝土材料在冲击作用下的力学行为, 使得从细观层次研究混凝土的力学响应成为研究热点, 形成了多种细观力学模型和方法, 如梁-

颗粒模型、随机粒子模型、随机骨料模型、格构模型等。其中,随机骨料模型能很好地刻画混凝土骨料的颗粒粒径级配,与真实的工程问题最为接近,且可以通过材料参数的赋值反映其细观的多相性,可用于分析混凝土材料在静载或低应变率条件下的力学行为。

在材料的动态特性实验研究方面,粗粒土的测试方法如原位动力测试、动三轴实验、共振柱实验和振动台实验等无法获得冲击加载条件下的粗粒土材料特性。Huang 等^[33, 34]采用 MSHPB (a modified split Hopkinson pressure bar, 一种改进的霍普金森压杆)方法测试了石英砂的动态压缩性能。分离式 Hopkinson 杆实验系统^[35]在研究高应变率加载条件下材料的动力力学特性方面应用得最为广泛,可用于进行低标号混凝土的动力学性能测试。

本书以卵石层介质为典型材料,获得多相非均匀脆性材料在冲击荷载作用下的动态力学特性的研究方法,建立基于有限元和离散元方法的数值建模技术及卵石层介质的动态本构模型、破坏准则,对机场跑道、公路等工程结构毁伤评估提供重要的技术支持,为类似非均质多相脆性材料的动力学特性研究提供参考。

参 考 文 献

- [1] 张凤国,李恩征. 大应变、高应变率及高压强条件下混凝土的计算模型[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 198-202.
- [2] 王政,倪玉山,曹菊珍,等. 冲击载荷下混凝土本构模型构建研究[J]. 高压物理学报, 2006, 20(4): 337-344.
- [3] 杨冬梅,王晓鸣. 反机场弹药斜侵彻多层介质靶的三维数值仿真[J]. 弹道学报, 2004, 16(3): 83-87.
- [4] 曾必强,姜春兰,王在成,等. 反跑道动能弹斜侵彻机场多层跑道的三维数值模拟[J]. 兵工学报, 2007, 28(12): 1433-1437.
- [5] 肖伦斌,张训忠. 邓肯-张模型对砂卵石土适用性的实验研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(7): 1-4.
- [6] 张玲玲,姚勇. 四川西北地区砂卵石土的直剪实验研究[J]. 路基工程, 2010, (3): 162-164.
- [7] 吴怀忠,王汝恒,刘汉峰,等. 围压和固结应力比对砂卵石土动力特性的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2006, (5): 111-114.
- [8] 王汝恒,贾彬,邓安福,等. 砂卵石土动力特性的动三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, (S2): 4059-4064.
- [9] 贾彬,王汝恒. 砂卵石土动强度的试验研究[J]. 工业建筑, 2006, (5): 71-73.
- [10] Duncan J M, Byrne P, Wong K S, et al. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for FEA of stress and movements in soil masses: Report No. UCB/GT/80-01[R]California: California University, 1980.
- [11] Lade P V, Yanamuroj A, Bopp P A. Significance of particle crushing in granular materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(4): 309-316.
- [12] Matsuoka H, Nakai T. Stress-strain Relationship of Soil Based on the "SMP" [M]. Tokyo: Proc. of IX ICSMFE, 1977: 153-162.
- [13] Li X, Yu H S, Li X S. Macro-micro relations in granular mechanics[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46: 4331-4341.
- [14] Andrade J E, Avila C F, Hall S A, et al. Multiscale modeling and characterization of granular matter: from grain kinematics to continuum mechanics[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2011, 59(2): 237-250.

- [15] 刘瑜. 基于颗粒接触模型的砂土剪切波速研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [16] 楚锡华. 颗粒材料的离散颗粒模型与离散-连续耦合模型及数值方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [17] 秦建敏. 基于离散元模拟的岩土力学性能研究及应变局部化理论分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [18] Furlong J R, Davis J F, Alme M L. Modeling the dynamic load/unload behavior of ceramics under impact loading[J]. RDA-TR-0030-0001, R&D Associates, 1990.
- [19] Rabczuk T, Eibl J. Modeling dynamic failure of concrete with meshfree methods[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32 (11): 1878-1897.
- [20] Huang J, Vicente da Silva M, Krabbenhoft K. Three-dimensional granular contact dynamics with rolling resistance[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 49 (4): 289-298.
- [21] Taylor L M, Chen E P, Kuszmaul J S. Microcrack-induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading[J]. Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, 1986, 55 (3): 301-320.
- [22] Georgin J F, Reynouard J M. Modeling of structures subjected to impact: concrete behavior under high strain rate[J]. Cement & Concrete Composites, 2003, 25 (1): 131-143.
- [23] Thabet A, Haldane D. Three-dimensional numerical simulation of the behavior of standard concrete test specimens when subjected to impact loading[J]. Computers and Structures, 2001, 79 (1): 21-31.
- [24] 王政, 倪玉山, 曹菊珍, 等. 冲击载荷下混凝土动态力学性能研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25 (6): 519-527.
- [25] Heider N, Hiermaier S. Numerical simulation of performance tandem warheads[C]//Iris Rose Crewther. 19th International Symposium Ballistics. Interlaken, Switzerland; Thun: IBS2001 Symposium Office, 2001: 1493-1499.
- [26] 高政国, 刘光廷. 二维混凝土随机骨料模型研究[J]. 清华大学学报, 2003, 43 (5): 710-714.
- [27] 邢纪波, 俞良群, 王泳嘉. 三维梁-颗粒模型与岩石材料细观力学行为模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 16 (6): 627-630.
- [28] 王宗敏, 邱志章. 混凝土细观随机骨料结构与有限元网格剖分[J]. 计算力学学报, 2005, 22 (6): 728-732.
- [29] Wang Z M, Kwan A K H, Chan H C. Mesoscopic study of concrete I: generation of random aggregate structure and finite element mesh[J]. Computers and Structures, 1999, 70 (5): 533-544.
- [30] Riedel W, Wicklein M, Thoma K. Shock properties of conventional and high strength concrete: experimental and mesomechanical analysis[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35 (3): 155-171.
- [31] Grote D L, Park S W, Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25 (9): 869-886.
- [32] Van Mier J G M. Fracture Processes of Concrete Assessment of Material Parameters for Fracture Models[M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [33] Huang J, Xua S, Hu S. Effects of grain size and gradation on the dynamic responses of quartz sands[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 59 (9): 1-10.
- [34] Huang J, Xua S, Hu S. Influence of particle breakage on the dynamic compression responses of brittle granular materials[J]. Mechanics of Materials, 2014, 68 (1): 15-28.
- [35] 陶俊林, 田常津, 陈裕泽, 等. SHPB 系统试件恒应变率加载实验方法研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24 (5): 413-418.

第2章 非均质多相材料数值几何建模方法

结合已有的细观力学模型研究成果，分析总结各类细观模型的优缺点，提出以随机骨料模型来描述非均质多相脆性材料的细观组成；以 C++ 程序为基础，开发用于描述混凝土三相介质的二维、三维投放程序，并结合实验数据验证数值模型的有效性；针对界面过渡区特殊的物理及几何性质，提出三种处理方法，并对各自特点进行对比，给出不同模型用于分析弹靶侵彻问题的适用范围。

2.1 混凝土细观力学模型研究现状

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，国内外很多研究人员利用基于细观力学层次的数值模型来研究非均质多相脆性材料的宏观力学性能，主要是针对混凝土这种典型的非均质脆性材料的静、动态力学性能。细观层次上，将混凝土视为由粗、细骨料，水泥水化产物，未水化水泥颗粒、孔隙、裂缝等所组成的多相复合材料（图 2-1）。目前应用较为广泛的细观力学模型主要有以下几种：格构模型、随机粒子模型、MH 细观模型、随机力学模型、随机骨料模型。

格构模型^[1]的基本思想是把待计算的连续体离散成三角形或四边形网格，网格一般由杆单元或者梁单元组成，引入简单的单元本构关系，如图 2-2 所示。为了模拟混凝土的非均匀性，梁和杆单元的力学参数可以假定服从某种既定的分布规律，该模型还可以考虑骨料等细观结构的随机分布特征。计算时，在外荷载作用下对整体网格进行线弹性（或弹塑性）分析，计算出格构中各单元的局部应力，超过破坏阈值的单元将被从系统中除去。单元的破坏为不可逆过程，单元破坏后，荷载将重新分配，再次计算以得出下一个破坏单元。不断重复该计算过程，直至整个系统完全破坏。Lilliu 等^[2]应用三维格构模型模拟了混凝土的断裂过程，同时研究了骨料含量对极限荷载和其延性的影响。Schlangen 等^[3]应用格构模型（采用梁单元）进行了混凝土的剪切、单轴拉伸和劈裂实验。以上研究表明，由该模型得到的荷载-位移曲线不太理想，反映出混凝土太脆，且该模型计算结果的精度依赖于单元类型和破坏准则的选取以及对混凝土材料各向异性特性的模拟程度。

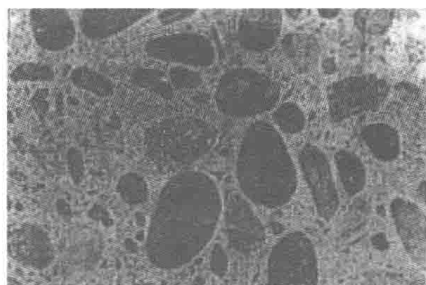


图 2-1 混凝土断面

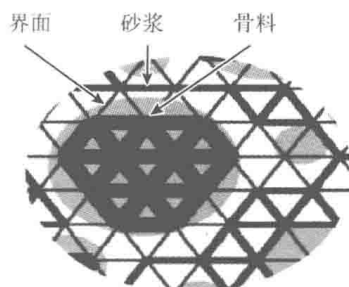


图 2-2 格构模型

随机粒子模型的基本原理是假设混凝土为三相复合材料，用随机分布在基质中的圆来表示骨料，骨料为弹性体，不发生破坏。骨料之间只有轴向接触力，忽略了骨料之间的剪切和弯曲作用力，即相当于由轴力杆连接（图 2-3），骨料周围的接触层满足非线性断裂力学的软化曲线。该模型通过单元的张拉破坏模拟材料开裂问题。Bazant 等^[4]对混凝土试件单轴受拉和三点弯曲受力状态下的裂纹扩展过程进行了模拟，并研究了试件的尺寸效应问题，结果表明该模型可以很好地模拟混凝土的开裂和破坏现象，但由于忽略了剪力和弯矩的影响，模拟的开裂区比实际情况下的更小、更窄。

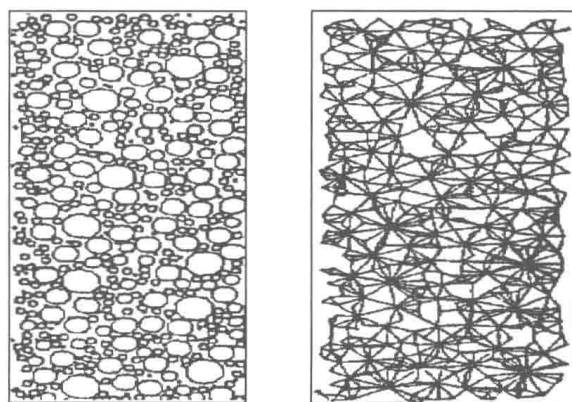


图 2-3 随机粒子模型

MH 细观模型是由 Mohamed 和 Hansen 提出的（图 2-4），模型假设混凝土是由砂浆基质、骨料和两者之间的界面组成的三相复合材料，模型中考虑了骨料在基质中分布的随机性以及各相组分的力学性质的随机本质，采用有限元法进行应力分析。该模型认为，拉裂是导致裂纹扩展的主要原因，所以假定单元只发生拉破坏，忽略了剪切破坏。该模型在模拟一些以拉破坏为主要原因的实验（如：单轴拉伸、单轴压缩）时，取得了令人满意的结果，但用该模型模拟混凝土在冲击荷载作用下的破坏过程的文献还未见报道。

随机力学模型是由东北大学的唐春安、朱万成等提出的。该模型假定混凝土为砂浆基质、骨料及两者之间的黏结带组成的三相复合材料，如图 2-5 所示。模型中各个组分用均匀的四边形网格表征，采用 Weibull 分布来描述混凝土各相组分内部结构的离散性，通过有限元法进行细观单元的应力和位移分析。按照弹性损伤本构关系描述细观单元的损伤演化，采用最大拉应力准则和摩尔库仑准则分别作为细观单元发生拉伸损伤和剪切损伤的阈值条件^[5]。文献[5]利用该模型对混凝土试件进行了单轴压缩和双轴荷载（拉压、压压、拉拉）作用下的破坏模拟。结果表明，该模型可以较好地反映混凝土材料在复杂应力状态下的裂纹扩展过程以及断裂过程的变形非线性、应力重分布等现象。文献[6]对不同尺寸混凝土单边裂纹紧凑拉伸试样的断裂过程及其强度的尺寸效应进行了数值模拟，数值模拟结果与 Bazant 等提出的尺寸效应规律表现出较好的一致性。该模型虽然考虑了各相力学特性在计算域内的随机分布，但未考虑试件内各级配骨料分布的随机性，而实际上，骨料级配和骨料在试件内的分布对混凝土试件的宏观力学特性均有一定影响。

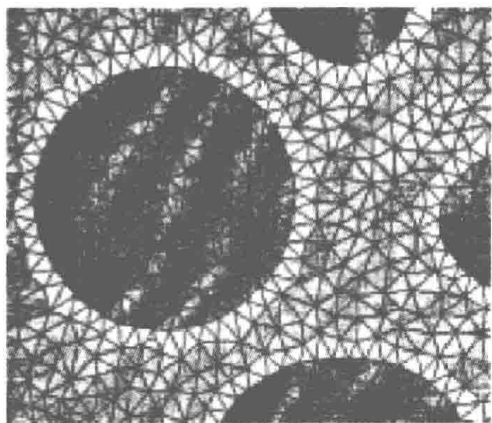


图 2-4 MH 模型

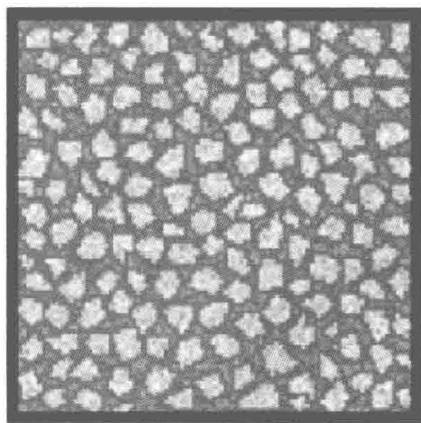


图 2-5 随机力学模型

随机骨料模型是由清华大学的刘光廷、王宗敏提出的，该模型将混凝土视作由骨料、水泥砂浆以及两者之间的黏结带组成的三相非均质复合材料。二维模型中借助富勒（Fuller）级配曲线和瓦拉文（Walraven）公式确定各粒径的骨料颗粒数，并按照蒙特卡罗方法在试件内生成随机分布的骨料模型，骨料形状主要用圆形、椭圆形、凸多边形模拟；三维模型中直接按级配曲线确定各粒径区间的骨料颗粒数，并用蒙特卡罗方法在试件内生成随机分布的骨料模型，骨料形状主要用球形、凸多面体模拟。模型采用有限元法计算单元的应力和应变。模型的有限元网格形成有两种方法：网格投影和各相材料自由网格划分。网格投影如图 2-6 所示，即将有限元网格投影到骨料结构上，根据骨料在网格中的位置判定单元类型，

并根据单元类型赋予相应的材料特性；各相材料的自由网格划分如图 2-7 所示，对试件剖面内的粗骨料和水泥砂浆基底及界面分别进行有限元网格划分并给单元赋予相应的材料属性。

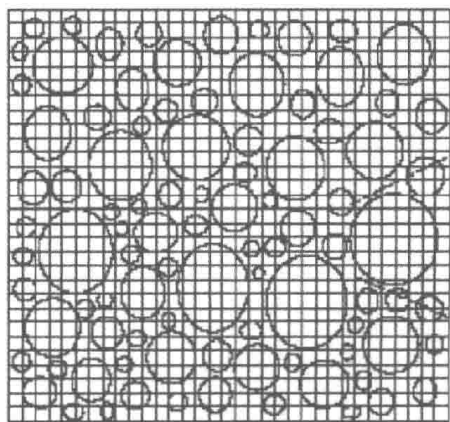


图 2-6 网格投影

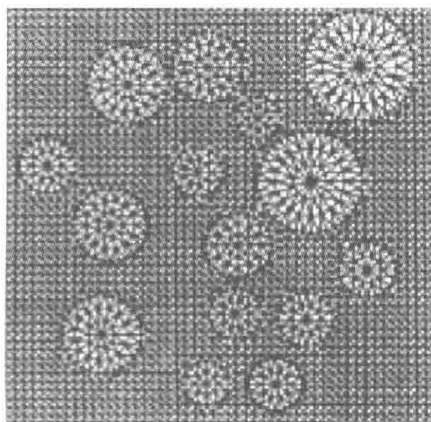


图 2-7 网格划分

文献[7]用混凝土随机骨料模型和非线性有限元技术模拟了单边裂纹受拉试件从损伤到断裂破坏的全过程，模拟的宏观结果与实验的破坏软化曲线近似。宋玉普^[8]基于随机骨料模型模拟了单轴抗拉、抗压的力学行为以及双轴下的强度及劈裂破坏过程，并引入了断裂力学的强度准则，模拟了各种受力状态下的裂纹扩展。文献[9]基于随机骨料模型对混凝土单轴压缩试件和三级配混凝土简支梁在静、动载作用下的力学性能和破坏过程进行了数值模拟分析，得出随机骨料模型用于模拟混凝土材料在静、动载作用下由于裂纹的萌生、扩展、贯通导致的破坏过程是可行的。文献[10]采用随机骨料模型在大型商业有限元软件 MSC.MARC 的基础上对东江拱坝的三级配混凝土试件在静、动载下的力学性能和破坏过程进行了数值模拟，得出混凝土宏观力学性能的离散性是其内部细观结构的差异造成的；黏结界面是混凝土中的薄弱部位，其力学性能对混凝土材料的强度影响很大，试件的破坏首先起源于黏结界面的开裂，并沿着界面扩展至砂浆中，直至贯穿试件。杜修力等^[11]基于随机骨料模型对混凝土在冲击荷载作用下的细观破坏机制进行了研究，给出了冲击荷载下试件的应力-应变曲线和动态抗压强度，研究结果表明，数值模拟结果与实验所得结果表现出较好的一致性。该模型能考虑骨料级配、粒径、形状以及随机分布特性等对混凝土材料响应的非均匀性影响，能够有效地反映材料在静、动荷载作用下裂纹的生成和扩展特点。

结合上述分析，由随机骨料模型的特点可知，该模型能反映骨料强度、粒径、分布位置等对混凝土宏观力学性能的影响，能够较好地反映非均质多相脆性材料的内部结构特点，故本书的研究以随机骨料模型为基础。

2.2 随机骨料模型投放算法流程

随机骨料模型投放算法主要包括以下几个步骤。

2.2.1 随机数的生成

蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法^[12], 也被称为随机模拟 (random simulation) 方法, 是一种利用重复的统计实验解决物理和数学问题的方法, 这类问题可以用一个随机过程来描述。混凝土试件中骨料颗粒在试件内的分布是一个随机过程, 因此可以通过蒙特卡罗方法来对这一过程进行模拟。确定骨料颗粒在试件内的分布位置及形状需要一种基本的工具, 这个工具就是随机数。在计算机中进行仿真模拟时, 就随机数的产生而言, 最基本的随机变量是在区间 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的随机变量, 其他分布形式的随机变量均可由其变换得到。设随机变量 X 的概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0, 1] \\ 0, & x \notin [0, 1] \end{cases} \quad (2-1)$$

则称 X 为区间 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的随机变量, 在计算机中产生的随机变量 X 的抽样序列 $\{x_n\}$ 称为随机变量 X 的随机数。目前, 在计算机中常用数学方法产生伪随机数, 其特点是速度快、内存占用小, 且具有良好的统计性质。本书采用同余法产生随机数序列, 首先通过 VC++ 6.0 中的 `rand()` 函数产生区间 $[0, 1]$ 上均匀分布的伪随机数 x , 然后通过相应的变换产生给定区间上均匀分布的随机数序列。如骨料中心点的坐标 (x_c, y_c, z_c) 在混凝土试件内服从均匀分布, 且 $x_c \in [x_{\min}, x_{\max}]$, $y_c \in [y_{\min}, y_{\max}]$, $z_c \in [z_{\min}, z_{\max}]$, 则

$$\begin{cases} x_c = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min})x \\ y_c = y_{\min} + (y_{\max} - y_{\min})y \\ z_c = z_{\min} + (z_{\max} - z_{\min})z \end{cases} \quad (2-2)$$

2.2.2 骨料级配、粒径和投放区域的确定

混凝土中的骨料分为细骨料和粗骨料^[13, 14], 对水工混凝土骨料的定义为: 85% 以上的质量通过 5mm 筛孔的骨料称为细骨料, 85% 以上的质量遗留在 5mm 筛孔上的骨料称为粗骨料。粗骨料按粒径分为小石 (5~20mm)、中石 (20~40mm)、大石 (40~80mm)、特大石 (80~150mm)。按包含的骨料粒径范围依次称为一、

二、三、四级配。常用的四级配骨料中，小石：中石：大石：特大石 = 2：2：3：3；三级配骨料中，小石：中石：大石 = 3：3：4；二级配骨料中，小石：中石 = 5.5：4.5。文献[15]中对常用的三种级配曲线与 Fuller 级配曲线进行了比较，得出二者吻合较好。Fuller 级配曲线是 Fuller 提出的理想的最大密实度三维级配曲线^[16]，表达式为

$$w(d)=\sqrt{d/d_{\max }} \tag{2-3}$$

式中， $w(d)$ 为骨料通过直径为 d 的筛孔的质量百分比； $d_{\max}$ 为最大骨料粒径。

Walraven 等^[17]基于 Fuller 公式将三维级配曲线转化为试件截面上任一点位于直径为 $d<d_0$ 的骨料内的概率 p_c ，即

$$\begin{aligned} p_c(d < d_0) = p_k \bigg[& 1.065 \left(\frac{d_0}{d_{\max}} \right)^{0.5} - 0.053 \left(\frac{d_0}{d_{\max}} \right)^4 - 0.012 \left(\frac{d_0}{d_{\max}} \right)^6 - 0.0045 \left(\frac{d_0}{d_{\max}} \right)^8 \\ & - 0.0025 \left(\frac{d_0}{d_{\max}} \right)^{10} \bigg] \end{aligned} \tag{2-4}$$

其中， d_0 为筛孔直径； $d_{\max}$ 为最大骨料粒径； p_k 为骨料（粗骨料和细骨料）体积占混凝土总体积的百分数。

根据不同的 d_0 值，由式（2-4）可求得 $p_c \sim d_0/d_{\max}$ 概率分布曲线，据此可求得试件截面上不同骨料粒径的颗粒数。

2.2.3 骨料投放算法及入侵判定

二维随机凸多边形骨料模型的生成是以随机生成的三角形和四边形骨料基为基础生长而成的（图 2-8），三维随机骨料模型中随机凸多面体通过在八面体骨料基的基础上生长而成（图 2-9），骨料基的基本几何构型决定了最终生成的随机凸多边形骨料的形状。

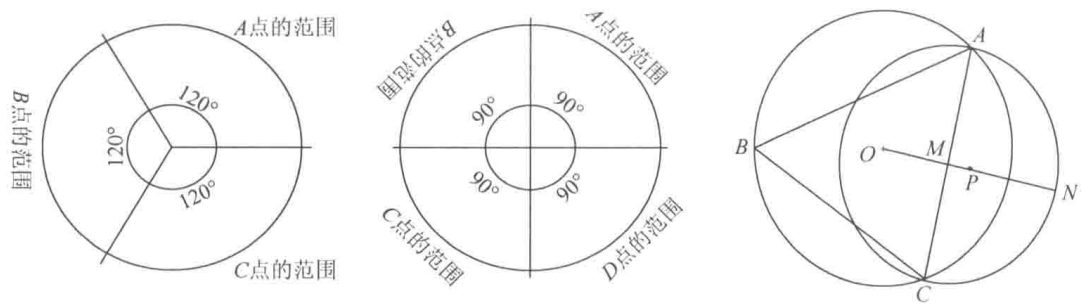


图 2-8 三角形及四边形骨料基顶点位置图