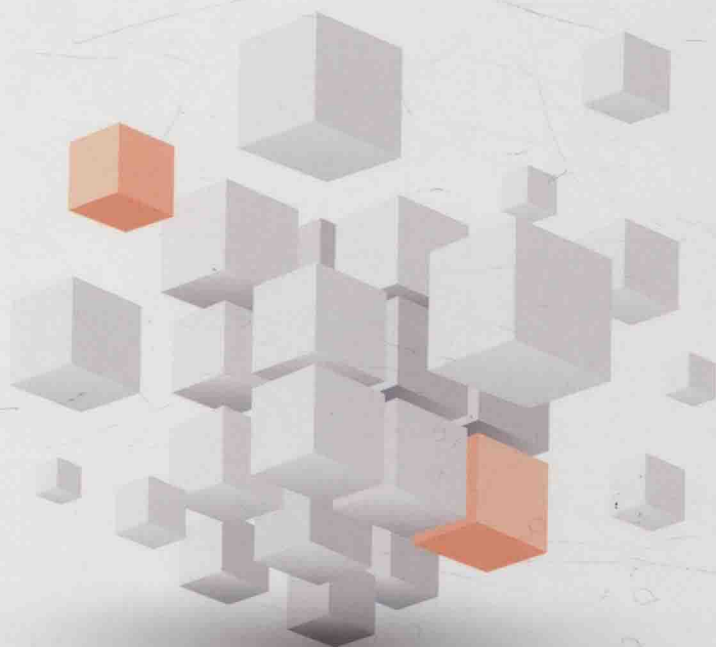




基于CT技术混凝土材料 细观破损演化分析

Analysis on Meso-fracture
Evolution of Concrete Materials Based on CT Technology

田 威 党发宁 丁卫华 著



中国建筑工业出版社

基于 CT 技术混凝土材料细观破损 演化分析

田 威 党发宁 丁卫华 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

基于 CT 技术混凝土材料细观破损演化分析/田威等

著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-112-19702-6

I. ①基… II. ①田… III. ①工业 CT-应用-混凝土-
建筑材料-破损机理-研究 IV. ①TU528-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 196718 号

本书介绍了当前国内外研究混凝土材料细观层次力学性质的最新进展, 总结了作者近年来在混凝土类准脆性岩土材料的破坏行为的研究成果。本书内容包括: 绪论; CT 扫描技术及适于 CT 试验的动态加载设备的研制; 基于 CT 技术的混凝土裂纹扩展的细观力学特性; 基于 CT 技术的混凝土细观破裂过程的 CT 图像分析; 基于 CT 裂纹演化规律的混凝土破坏研究; 混凝土细观力学有限元模型的建立; 基于 CT 图像的混凝土损伤演化方程及其本构关系; 基于细观力学的混凝土单轴压缩破坏数值模拟研究; 混凝土 CT 图像的三维重建技术研究。本书可供土木工程、工程力学、材料科学与工程领域的教学及科研人员参考。

责任编辑: 王 梅 辛海丽

责任设计: 王国羽

责任校对: 王宇枢 李欣慰

基于 CT 技术混凝土材料细观破损演化分析

田 威 党发宁 丁卫华 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

唐山龙达图文制作有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11 字数: 270 千字

2016 年 12 月第一版 2016 年 12 月第一次印刷

定价: 39.00 元

ISBN 978-7-112-19702-6

(29166)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

混凝土材料自问世以来就因其所具有的许多优点而广泛地应用于矿山、水利、公路、铁路、国防、能源、人防和建筑等领域。在这些人类工程活动中均涉及混凝土材料的物理力学问题。而通过何种手段有效揭示混凝土材料的物理力学特性、如何科学准确地刻画其力学行为,是混凝土材料这一研究领域的重大课题。同时,正确评价混凝土类结构的稳定性和正确认识其破坏机理是关系工程经济安全和国计民生的基本问题。因此,混凝土材料的力学性能和破坏机制的研究是亟待解决的问题。

混凝土材料的破裂是一个复杂的非线性材料损伤演化过程,其一直是力学、材料和工程各学科的研究热点和难点之一。破裂过程主要表现在材料内部初始缺陷能量积聚,微裂纹不断萌生、扩展、贯通直至整体失稳,其宏观表现为材料力学性能的不断损伤劣化。本书将细观力学、损伤力学、统计理论和数值计算理论相结合,运用可以有效观测材料细观损伤演化的 CT 技术对混凝土材料裂纹的扩展、贯通直至材料最终破坏的过程进行了研究,揭示了混凝土材料的细观损伤破裂机理。

本书中的研究内容是在西安理工大学与中国水利水电科学研究院合作的国家自然科学基金重点项目——西部高拱坝抗震安全前沿性基础科学问题研究的基础上进行的。在研究过程中,一直得到陈厚群院士的关心及指导,在此表示衷心的感谢!

本书的 CT 试验是在湖北宜昌三峡大学附属仁和医院完成的,试验期间得到了三峡大学彭刚教授以及 CT 室医师的大力支持与指导,在此表示衷心的感谢。研究生高小明、时文涛、张鹏坤、马北京、韩女、裴志茹、田雪萍进行了书稿的校核,在此表示感谢。

本书的内容是作者负责的国家自然科学基金(51009010, 51379015, 51579013)、陕西省自然科学基金(2015JM5160)的部分研究成果。在此对国家自然科学基金委和项目的资助单位表示衷心的感谢。

需要指出的是,由于时间和经费的限制,本书的研究成果只是初步的,加之作者理论与学识水平有限,书中难免谬误与不足之处,敬请读者批评指正!

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 混凝土宏观静态力学性能研究	2
1.1.1 基于断裂力学的混凝土宏观模型	2
1.1.2 基于损伤力学的混凝土破坏研究	4
1.2 混凝土宏观动态力学性能研究	6
1.2.1 混凝土动态力学特性宏观试验的研究现状	6
1.2.2 混凝土动态强度本构模型的研究现状	8
1.2.3 混凝土动态强度机制的研究途径	8
1.2.4 混凝土动态强度变化细观机制的理论研究	9
1.3 混凝土细观力学的研究	9
1.3.1 层次研究方法	10
1.3.2 混凝土的细观组成	11
1.3.3 混凝土细观力学的研究方法	13
1.3.4 细观力学数值模拟研究方法	13
1.4 混凝土材料细观损伤破裂机理	18
1.4.1 混凝土材料细观损伤破裂特点	18
1.4.2 混凝土细观损伤破坏过程机理分析	20
1.5 本书的内容简介	20
参考文献	22
第 2 章 CT 扫描技术及适于 CT 试验的动态加载设备的研制	29
2.1 CT 扫描原理与方法	29
2.2 CT 机构成	30
2.2.1 医用 CT (MCT)	31
2.2.2 工业 CT (ICT)	33
2.2.3 工业 CT (ICT) 与医用 CT (MCT) 的差别	34
2.2.4 混凝土试件工业 CT 扫描试验研究	35
2.3 适用于 CT 扫描的动力加载试验设备的研制	35
2.3.1 设计思路与技术难点	36
2.3.2 关键技术与仪器性能	37
2.4 混凝土 CT 试验调试系统过程	39
2.4.1 试样制备过程	39
2.4.2 试样的粘结	39
2.4.3 装样	40

2.4.4 加载与扫描过程	41
2.5 混凝土 CT 试验调试系统结果	42
2.6 本章小结	44
参考文献	44
第 3 章 基于 CT 技术的混凝土裂纹扩展的细观力学特性	45
3.1 混凝土静态力学实时 CT 试验	45
3.1.1 一级配混凝土静力压缩实时 CT 试验	45
3.1.2 混凝土静态力学拉伸实时 CT 试验 (CONC-004)	52
3.2 混凝土动态力学实时 CT 试验	57
3.2.1 混凝土动力压缩的实时 CT 试验	57
3.2.2 一级配混凝土动力拉伸实时 CT 试验 (CONC-15)	61
3.3 本章小结	65
第 4 章 基于 CT 技术的混凝土细观破裂过程的 CT 图像分析	66
4.1 混凝土 CT 图像分析方法	66
4.2 基于不同图像处理技术的混凝土 CT 图像分析	66
4.2.1 基于 CT 数直方图技术的混凝土损伤演化过程分析	66
4.2.2 基于最大方差理论的大津法裂纹提取方法	70
4.2.3 基于像素点的 CT 数变化量的裂纹提取方法	71
4.2.4 混凝土 CT 等密度分割图像分析方法	73
4.2.5 基于支持向量机理论的混凝土 CT 图像分析方法	75
4.3 CT 数分析	80
4.3.1 静力压缩试验 CT 数分析	80
4.3.2 动力压缩试验 CT 数分析	82
4.3.3 静力拉伸试验 CT 数分析	83
4.3.4 动力拉伸试验 CT 数分析	84
4.4 本章小结	84
参考文献	85
第 5 章 基于 CT 裂纹演化规律的混凝土破坏研究	87
5.1 基于 CT 裂纹演化规律的混凝土破坏阶段分析	87
5.2 混凝土 CT 图像中裂纹区域的分析	87
5.3 根据差值 CT 图像判断裂纹是否开裂	88
5.4 混凝土分区描述理论及其应用	90
5.4.1 分区描述理论的依据	90
5.4.2 分区阈值的确定	91
5.4.3 分区结果描述	93
5.4.4 各区的定量化描述	98
5.5 基于 CT 图像的混凝土损伤演化的分形研究	100

5.5.1 分形理论	101
5.5.2 混凝土材料分形特征研究的概况	102
5.5.3 基于 CT 图像的混凝土损伤演化的分形计算	103
5.5.4 混凝土单轴压缩 CT 图像的分维数计算和分析	105
5.5.5 动力作用下混凝土分形特征	108
5.6 静、动力作用下混凝土分形特征比较	111
5.7 本章小结	112
参考文献	113
第 6 章 混凝土细观力学有限元模型的建立	115
6.1 随机变量产生方法	115
6.1.1 蒙特卡罗法简介	115
6.1.2 随机数及其产生	116
6.2 混凝土骨料三维随机分布模型	117
6.2.1 混凝土骨料三维随机分布模型	117
6.2.2 随机骨料模型细观有限元剖分	119
6.2.3 改进后混凝土骨料三维随机分布模型	119
6.3 本章小结	123
参考文献	123
第 7 章 基于 CT 图像的混凝土损伤演化方程及其本构关系	124
7.1 基于 CT 试验的混凝土损伤演化方程及本构模型	124
7.2 基于 CT 试验的混凝土统计损伤演化方程	127
7.3 基于 CT 试验混凝土平均 CT 数损伤演化方程研究	128
7.3.1 损伤变量的建立	130
7.3.2 损伤演化方程的建立	131
7.3.3 损伤本构关系的建立	132
7.4 基于 CT 试验的混凝土分形维数损伤演化方程	133
7.4.1 细观统计损伤模型的建立	133
7.4.2 细观统计损伤模型中参数 α 的确定	134
7.4.3 损伤变量的建立	134
7.4.4 损伤演化方程的建立	136
7.5 本章小结	136
参考文献	137
第 8 章 基于细观力学的混凝土单轴压缩破坏数值模拟研究	139
8.1 基于 CT 试验所建立的损伤演化方程的混凝土圆柱体试件破裂过程的数值模拟	139
8.1.1 数值模拟的材料参数与计算条件	139
8.1.2 计算过程	141

8.1.3 数值模拟过程	141
8.1.4 混凝土圆柱体试件细观模型数值模拟结果	141
8.2 计算结果分析	151
8.3 数值模拟计算结果与 CT 试验结果对比分析	151
8.3.1 数值模拟图与 CT 试验图像比较	151
8.3.2 数值计算与 CT 试验荷载一位移曲线比较	154
8.4 本章小结	154
第 9 章 混凝土 CT 图像的三维重建技术研究	156
9.1 已经进行的 CT 切片图像的三维重建	156
9.2 基于 MATLAB 环境下 CT 切片图像的三维重建	157
9.2.1 三维重建的方法	157
9.2.2 三维重建的步骤	158
9.2.3 混凝土 CT 图像三维体重建	159
9.3 基于 MIMICS 环境下 CT 切片图像的三维重建	160
9.3.1 原始图像数据获得	161
9.3.2 CT 图像的处理和几何模型的建立	161
9.3.3 压三维重建图像	161
9.3.4 拉三维重建图像	163
9.3.5 有限元模型的建立	164
9.4 有限元模型的数值计算	164
9.5 本章小结	165
参考文献	166

第 1 章 绪 论

混凝土自问世以来就因其所具有的许多优点而成为应用很广的建筑材料之一,广泛应用于各个领域。在矿山、水利、公路、铁路、国防、能源、人防和建筑等众多的人类工程活动中均涉及混凝土的物理、力学问题。通过何种手段有效揭示混凝土材料的物理力学特性、如何科学准确地刻画其力学行为,是混凝土材料这一研究领域的重大课题,而能否正确评价混凝土结构的稳定性和正确认识其破坏机理是关系国计民生和工程经济安全的基本问题,因此国内外许多学者对其力学性能和破坏机制进行了大量的研究。

混凝土是一种特殊的天然缺陷材料,由级配骨料、水泥、砂浆及孔隙等组成,其内部结构非常复杂,具有多尺度性和独特的物理和力学性质,是一种工程应用相当广泛的不均匀材料。为了研究的方便,往往忽略混凝土的复杂结构,把混凝土材料视为宏观连续体。在此基础上,化繁为简进行混凝土结构分析,这对解决工程问题是非常重要和必要的。但是这种研究模式制约了人们对于混凝土材料在各种静动荷载作用下内部裂纹萌生、扩展、贯通直至宏观裂纹形成至失稳破裂过程的研究,也无法反映混凝土断裂过程中表现出来的局部化和应力重分布等特征,更无法准确反映混凝土骨料的集合特征参数(骨料粒形、粒径)、配合比参数和各种掺料等对混凝土或改性混凝土物理力学特性的影响。研究各种空间尺度缺陷对混凝土材料的变形、破坏和稳定性所起的作用,或者作用的大小,是目前混凝土材料研究所面临的最深刻而又最艰难的课题之一^[1,2]。尽管相关领域的研究已取得一些成果,而且国内外很多学者和专家早已注意到这些问题,但受当前研究手段和相关专业的发展不足等主客观条件的制约,这些方面的研究工作开展得还不是很深入。

为了解决以上问题,以细观层次为基础的混凝土数值模拟方法应运而生。这种方法把混凝土看成是由骨料、界面和砂浆组成的非均质复合材料,充分考虑了骨料分布的随机性、材料的非均匀性和各组分之间的相互作用影响,采用力学理论对这类复合材料的试件进行结构分析,研究其承受荷载后的破坏机理,并通过和试验结果进行对比,比较真实地揭示混凝土损伤和微裂缝的发展过程,可以为准确地描述混凝土的宏观力学行为提供有力的依据。

用细观数值方法研究混凝土内部的破坏机理,另一关键是确定组成混凝土的各相材料的力学参数和强度参数,然而由于仪器的测量误差和材料的变异性,用实测参数去计算所得的破坏形式与试验结果往往存在较大的差异,实践中需要不断地对计算参数和破坏模式进行校核。为此,需要进行与数值模型的几何参数、边界条件和加载过程完全相同的 CT 实时试验,达到数值试验和 CT 试验可以相互验证,以便准确地比较研究试样内部的裂纹演化规律。

最近十几年来,X 射线 CT 试验成为岩石材料细观破裂过程的热点研究课题,其成果主要表现在加载条件的变化方面。由于岩石和混凝土材料密度近似,岩石 CT 理论和图像分析方法均可用来研究混凝土材料的细观结构^[3]。X 射线混凝土 CT 试验,即采用医用

CT 或工业 CT 扫描混凝土试件断面获得混凝土 CT 图像, CT 图像上每个点的数据就是 CT 数, 其值的大小在 CT 图像上由灰度表示。根据 CT 的物理原理, CT 数与对应的物质密度成正比, 图像中亮度高的地方 CT 数大, 表示该区物质组成成分密度高, 暗色的地方 CT 数值较低, 表示该区的物质组成成分密度低。混凝土各组分物理密度不同, 反映在 CT 图像上各部位的 CT 数 (正比于物理密度) 不同, 从而形成骨料、砂浆、孔洞等灰度不同的影像图。混凝土试件受力产生细观裂纹后, 相应的 CT 图像部位灰度降低 (即 CT 数减小), 形成线状或环状影像, 称之为 CT 尺度裂纹, 属于基于 X 射线 CT 分辨率条件下的细观裂纹, 这是混凝土 CT 的主要研究对象。这样就可以通过 CT 图像的影像特征分析混凝土细观结构及其受力后结构的变化过程, X 射线 CT 观察混凝土裂纹演化过程最大优点在于它的无损探测性能和高分辨率。

1.1 混凝土宏观静态力学性能研究

1.1.1 基于断裂力学的混凝土宏观模型

1961 年, Kaplan^[4] 首先将断裂力学引入混凝土材料研究中。主要研究带裂缝的混凝土体的强度和裂缝的传播规律, 从力学侧面研究宏观的断裂现象, 包括宏观裂缝的形成、扩展、失稳开裂、传播以及止裂等。自 Kaplan 以来, 关于混凝土断裂力学的研究工作非常活跃, 许多学者在这个领域进行了大量的工作, 取得了丰硕的成果, 但随后的工作几乎都是在假定线弹性断裂力学对混凝土成立的前提下, 对其断裂参量的研究。

然而, 随着近年来对大体积混凝土的研究表明, 断裂参量并不能真正代表混凝土的断裂韧度。由于混凝土的复杂结构, 只有当试件尺寸较大时, 微裂纹区和产生的分支裂纹相对于破坏产生的裂纹来说尺寸较小时, 可以忽略不计。在这方面研究中, 已有许多较为成功的应用。但是, 当混凝土裂纹端部产生的微裂纹区和亚临界扩展长度较大而不能忽略时, 用线弹性断裂力学分析混凝土构件中的裂纹扩展就不再合适了。因此, 就在线弹性断裂力学开始应用于混凝土材料断裂研究的 10 年内, 一些研究者发现线弹性断裂力学的概念和研究方法已不再适合于混凝土材料的结论^[5]。

根据混凝土的变形特点, 人们提出了许多宏观断裂模型来模拟混凝土断裂过程的非线性。在有限元的数值分析中人们提出了分离裂缝模型 (Discrete Crack Model)^[6,7] 和弥散裂缝模型 (Smeared Crack Model)^[6] 来模拟混凝土受拉开裂后所形成的裂缝。此后, 在这两个模型的基础上, 人们又发展提出了虚拟裂纹模型 (Fictitious Crack Model, FCM)^[8]、钝化裂纹带模型 (Blunt Crack Band Model, CBM)^[9]、非局部化的模型 (No Local Model)^[10~12]。

1. 分离型裂纹模型 (Discrete Crack Model)

该模型认为裂纹在相邻单元的边界上形成, 在相邻单元的混凝土达到开裂条件后, 将其共同节点断开, 并在裂纹两边的混凝土单元引入各自的节点。当主应力相对于单元边界倾斜一定角度时, 调节单元边界方向, 使形成的裂纹方向垂直于主应力方向。分离型裂纹模型的缺点是由于计算前裂纹未知的一般情况, 开裂后需要改变节点数目和单元形状, 所以计算方法复杂, 计算时间较长。由于该模型很难完成自动计算, 目前应用场合比较有限。

限。近年来,随着计算技术的发展,该模型在有限元法的实施中,一些学者也提出了简化的高精度和高效率有限元网格动态重新划分策略,使其更加容易地应用于裂纹扩展的模拟。

2. 弥散裂缝模型 (Smeared Crack Model)

该模型假定裂纹在单元内部形成。当单元内的混凝土达到开裂条件后,就在垂直于主拉应力的方向产生裂纹。该模型用无数穿过开裂单元的平行裂纹表示混凝土裂纹,垂直裂纹方向不再能承受拉应力,并假定产生裂纹后的混凝土仍然保持连续,但是要把混凝土看作是正交各向异性的材料。因此,在混凝土开裂后,根据单元的受力状态要进行其材料力学性质的调整,由于上述的调整,在开裂一瞬间,单元失去了平衡。因而必须将不平衡的应力转换成节点力重新分配,使其达到新的平衡。混凝土开裂后,裂纹面材料按照相应的裂纹面本构关系来分析。弥散型裂纹模型的缺点是裂纹的间距和宽度较难直接计算,裂纹的情况受单元大小的影响较大。此外,Bazant认为该模型应用于有限元计算时不能模拟混凝土的尺寸效应,并且分析的结果对单元的划分很敏感,具有明显的网格依赖性(Mesh Objectivity)。

3. 虚拟裂纹模型 (Fictitious Crack Model)

该模型由瑞典隆德工学院的 Hillerborg 教授以混凝土杆件单轴受拉时的断裂实验为基础,提出了虚拟裂纹模型。该模型属于分离型裂纹模型的范畴。当该杆件受拉、内部应力达到其抗拉强度时,在杆件的某个部位将出现含有很多微裂纹的断裂区。断裂区可发生在杆件的任何部位。随着杆件变形的增长,断裂区内微裂纹不断发展,裂纹尖端应力集中开始释放,裂纹区以外的部分则同时开始卸载。通过实验可以测量断裂区域的应变软化曲线,并由此可以定义混凝土的Ⅰ型断裂能 G_F ,在虚拟裂纹模型中,认为断裂能 G_F ,是与混凝土的配合比、强度、集料种类和粒度、水泥强度等级等有关的材料特性常数。 G_F 要通过混凝土断裂试验确定。混凝土的断裂能可以用直接拉伸试件、三点弯曲试件或紧凑拉伸试件等进行测试。国际材料和结构试验室联合会(RILEM)的混凝土断裂力学委员会决定用三点弯曲梁试件测定混凝土的断裂能,并于1985年公布了测定混凝土Ⅰ型断裂能的试验标准。RILEM委员会于1989年提出了一系列测试混凝土混合型断裂能的方法,建议使用四点弯曲剪切试验测定混凝土的Ⅱ型断裂能。通过对700个用三点弯曲梁测试断裂能的比较,Hillerborg得出混凝土的断裂能随着最大骨料粒径的增加、凝期的加长以及水灰比减小而增大的结论。但实际上各个测试试验数据的离散性较大,到底这些参数如何影响断裂能还未完全确定。虚拟裂纹模型还有许多缺点,例如,即使是在单轴拉伸应力状态,进行软化曲线的直接测量也是非常困难的。并且,人们对于直接拉伸实验数据的可靠性和重要性也产生了怀疑。另外,即使是在直接拉伸条件下,裂纹也不仅仅受到垂直于裂纹表面的拉应力作用,同时还受到平行于裂纹表面的剪切应力,这显然是一个复杂应力状态,不能简单地认为裂纹萌生、扩展只与拉应力有关。虚拟裂纹模型很难处理多裂纹的扩展问题。

4. 钝裂纹带模型 (Blunt Crack Band Model)

美国西北大学 Bazant 教授认为,用有限单元法研究混凝土裂纹扩展时可以用一条包含密集、平行裂纹的带来模拟实际裂纹和断裂区。这条裂纹具有一定的宽度,所以裂纹尖端是钝的,因此叫作“钝裂纹带模型”。该模型属于分布型裂纹模型的范畴,能够研究平

面问题中的断裂问题。该模型初看起来似乎与普通的分散裂纹模型没有什么区别,但是 Bazant 和 Oh 认为分散裂纹模型是与单元大小相关的,而钝裂纹带模型仍然应用了虚拟裂纹模型中提出的应变软化曲线和断裂能的概念,使得分析结果与有限元网格大小无关。将裂纹带看成是正交异性介质,对弹性刚度矩阵进行修正来模拟裂纹。同时该模型还提出了垂直于裂纹方向承受剪应力时类似的剪切应变软化曲线和Ⅱ型断裂能,并提出将软化带的宽度作为材料参数。Bazant 认为该宽度作为材料参数的软化带的宽度必须足够大,其数值为三倍的骨料尺寸,以使混凝土能够被视为均匀材料。该模型可以方便地确定裂纹带以及结构的应力和变形,具有分散裂纹模型的优缺点。但是,即使采用了一些先进的微观观察技术,软化带的宽度等参数的测量实际上很难实现。

5. 非局部化的模型 (No Local Model)

为了能够在计算中反映混凝土材料的非均质性,许多学者提出了空间平均化概念的非局部模型。传统的非局部模型认为介质中某一点处的应变不仅与该点的应变有关,而且与该点周围一定范围内其余点的应变有关。实际计算中发现,这种非局部模型并不能模拟诸如剪切、开裂等引起的应变软化现象,而且由传统非局部模型即使材料矩阵是对称的条件下推出的单元刚度矩阵也是不对称的。于是 Bazant 在将非局部模型引入混凝土开裂分析时,提出了重叠非局部模型。这个模型不仅考虑一点的应变应该在代表空间进行平均化处理,而且将应力在相同的空间进行平均。同时,在建立平衡方程时,在非局部应力场上叠加一个局部应力场。利用这个模型对一维和二维的问题进行了模拟分析,发现利用这个模型形成的整体刚度矩阵是正定的,而且能够模拟应变软化现象,解也不具有网格敏感性问题的。但是,在重叠非局部模型中,弹性区域与软化区域都用非局部模型来表达。对于处于弹性状况下的结构,计算结果与用传统局部模型计算的结果不一致,而且需多重非局部网格与局部网格的重叠计算,在结构边界需要特殊的处理技巧。因而在计算过程中,效率不高,程序的处理也复杂。于是人们提出了多种改进方法:一种改进方法是仅将表达软化特性的变量用非局部模型表达,而对应力、应变等变量仍然用局部模型表达。这样微分方程仍能保持原有的形式,而且不需要特殊的边界处理。对这种模型做了一个全面的回顾与评价。另一种改进方法是针对利用弹塑性理论建立的开裂模型,在这个模型中,开裂后单元的应变被分解成两部分,一部分是弹性应变,另外一部分是由开裂引起的塑性应变。

综上所述,混凝土的宏观断裂模型认为裂纹尖端存在着较大的应变软化区,以应变软化机理将非线性本构关系引入到混凝土断裂分析中,从宏观反应上对混凝土类材料进行了深入研究。但是宏观模型在本质上尚没有能力去捕捉混凝土这类脆性非均质材料的非弹性变形和断裂的详细过程以及材料非均质的随机性产生的影响,关于混凝土内微裂纹、骨料、界面对材料破坏的影响还有待进一步的研究。

1.1.2 基于损伤力学的混凝土破坏研究

断裂力学只研究固体中裂纹型缺陷的扩展规律,却无法分析宏观裂纹出现以前材料中的微缺陷或微裂纹的形成及其发展对材料力学性能的影响,而且许多微裂纹的存在并不能简化为宏观裂纹,这是断裂力学理论本身的局限性。对于混凝土来说,要研究其受力后的变形和破坏过程,不但要研究已存在裂纹的扩展规律,而且还要研究新裂纹的萌生、裂纹的扩展和贯通,但是损伤力学的产生弥补了断裂力学的不足,它主要是在连续介质力学和

热力学的基础上,采用固体力学的方法研究材料力学性能的演化直至破坏的全过程。因此为了更切合实际,就必须把损伤力学和断裂力学结合起来研究混凝土的破坏过程^[13]。

损伤理论适用于混凝土的破坏理由在于^[14]:

1. 混凝土的损伤发展过程是连续的,且在很小的应力或应变下即已发生裂缝,也就是说混凝土是一种裂纹敏感性材料。

2. 可以将外界因素作用以前的混凝土体内的缺陷作为初始损伤处理。

Dougill^[15]首次将损伤理论应用于对混凝土的研究中,后来很多学者都先后进入了这个研究领域,他们对混凝土损伤的研究主要集中在对混凝土损伤本构模型的研究和疲劳累积损伤的研究两个方面。提出了若干个混凝土的损伤模型和损伤演变方程,解释了很多混凝土材料的损伤和破坏现象。其中,以宏观损伤模型居多。

Mazars^[16]损伤模型和 Loland^[17]损伤模型是较早用损伤力学来研究混凝土单轴拉伸力学行为得出的结果,他们的研究方法都是参照实验得出的应力-应变曲线,把拉伸曲线划分为两段,即应力峰值以前和峰值之后,对应于这两个阶段,损伤的扩展分为两个区域,每个区域内的损伤扩展用不同的函数来模拟。

Loland 损伤模型认为当应变小于峰值应力所对应的应变 ϵ_f 时,裂纹在整个材料中萌生和扩展,且保持在一个很小的限度内;第二个阶段当应变大于 ϵ_f 时,裂纹主要在破坏区内不稳定扩展。

此外,还有分段线性损伤模型,分段曲线损伤模型等^[14],其模型建立的思路都是把应力-应变曲线分成两段,在不同的应力-应变阶段用不同的方程来描述。以上的几个模型都属于弹性各向同性损伤模型。

为了分析混凝土损伤的各向异性,将混凝土看成是各向同性材料,但是将混凝土的损伤看成是各向异性。Sidoroff^[18]等人提出了能量等效原理,认为若用有效应力张量和有效应变张量代入无损伤材料的弹性余能表达式,即可得到受损材料的弹性余能。基于此能量等效原理,可以得到损伤材料的应力-应变关系。

其他的混凝土各向异性损伤模型还有:Krajcinovic^[19]损伤模型;余天庆提出的正交异性损伤模型^[14]等。研究表明,混凝土材料由于内部缺陷导致的初始损伤是各向同性的,而且从宏观平均的角度看混凝土的力学性质也是各向同性的。但是,随着受到环境和外荷载的作用,变形的累积和局部的应力集中引起损伤的演化,这种损伤是各向异性的。所以说,基于能量分析建立的各向异性损伤模型是一个重要的研究方向。

基于损伤原理,美国西北大学的 Bazant 于 1985 年提出了微平面模型^[20] (Micro-plane Model)。该模型的实质是认为在细观尺度下裂纹的开裂方向是任意的,对于普通混凝土而言,裂纹经常穿过骨料周围的界面,裂纹穿过的路径叫作微平面,而微平面上的应变与总应变动态相关。因此,可以用微平面上的正应变或者剪应变作为表征损伤的内变量。该模型在概念上是非常明确的,表征了混凝土的损伤与裂纹扩展路径有关。但是,在实施和应用中往往比较繁琐。

综上所述,基于混凝土平均层次建立的断裂和损伤模型忽略了混凝土材料内部复杂的细观结构,难以揭示材料变形和破坏的物理机理,特别是天然存在的大量的细、微观缺陷,如骨料界面、孔洞以及随机分布的微裂纹在荷载作用时的扩展对混凝土力学性能的影响。其宏观力学性能受其细观结构的控制,宏观的破坏行为是由于细观尺度上的损伤和断

裂行为的累积和发展的结果。因此,对混凝土性能的研究除了从平均的角度进行研究外,更关键的还应从混凝土的细观结构入手,利用数值模拟的研究方法,抓住混凝土材料组成及其力学性质的非均匀性,结合理论和试验成果,建立数值模型,对混凝土材料的力学性能和破坏过程进行研究。

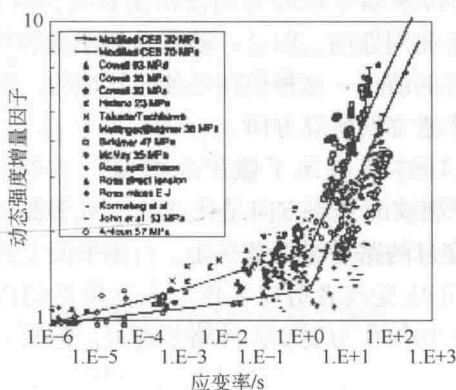
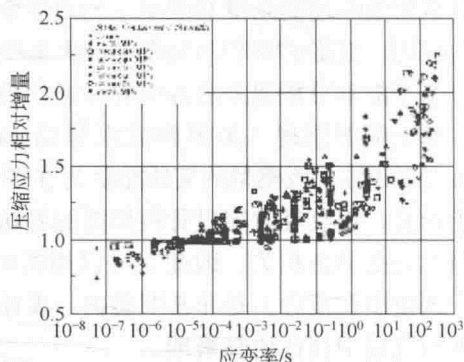
1.2 混凝土宏观动态力学性能研究

1.2.1 混凝土动态力学特性宏观试验的研究现状

早在 1917 年 Abrams^[21]发现混凝土材料抗压强度存在应变率敏感性。表示混凝土材料动态力学性能研究主要集中在宏观试验方面。随着试验装置与技术的不断进步,动态试验的应变率也越来越高,并取得了丰富的成果^[22,23]。

Malvar^[24]描述了混凝土材料抗拉强度的应变率敏感性。总结了混凝土的压缩应变率效应,从试验设备和方法、动态强度特性、动态变形特性及其影响因素等几方面总结了前人的研究成果。可以看出,这些试验结果的离散性比较大。而造成这种情况的原因可能有两方面,其一是进行试验的混凝土自身性能存在差别,另一可能原因是由于试验设备误差和试验方案不同,还有可能是一些没有弄清楚和未被发现的因素影响试验结果。

欧洲混凝土委员会 (CCEB) 也根据大量的试验结果, 给出了建议的混凝土动态强度计算公式。美国垦务局的 Raphael^[22] 根据西方 5 座混凝土坝钻孔取样试验结果, 提出了地震荷载下混凝土动力强度提高的经验公式。我国现行《水工建筑物抗震设计规范》DL 5073—2000 也作了类似规定, 其中指出“混凝土动态强度和动态弹性模量的标准值可较其静态标准值提高 30%, 混凝土动态抗拉强度标准值可取为动态抗压强度标准值的 10%”^[25]。混凝土的动态强度随加载率的增加而增加的趋势是明显的, 但增长规律随混凝土的具体条件而有所不同, 实际情况比 Raphael 的结论复杂得多^[26]。

图 1-1 混凝土动态拉伸强度^[24]图 1-2 混凝土静态抗压强度^[27]

由于混凝土是一种抗拉强度很低的准脆性材料,强震作用下,在坝体拉应力较大的薄弱部位,材料的力学性能将呈现损伤演化以至于反复开裂和闭合的断裂特性。^[28]因此,研

究混凝土抗拉强度在高应变率作用下的变化规律成为热点。

我国学者也开展了大量相关混凝土材料应变率的特性研究成果,大连理工大学尚仁杰^[29]等针对地震荷载($10^{-5} \sim 10^{-2}/s$)作用下混凝土结构的受力、变形特点,用MTS试验系统对混凝土材料拉、压全曲线、动态力学参数及动态变形机理等动态本构行为进行了研究。

侯顺载^[30]等结合小湾拱坝工程,在国内首次开展高拱坝受力特征条件下大坝全级配仿真混凝土动态特性和不同初始静载影响的试验研究,给出了大坝全级配仿真混凝土静态弯拉特性参数(强度、模量、泊松比)以及与湿筛混凝土之间的关系,探讨了不同初始静载对混凝土动载下极限抗压强度和极限弯拉强度的影响。董毓利^[31]等用MTS试验系统做了不同应变率($10^{-5} \sim 10^{-2}/s$)下混凝土受压全过程试验,发现应变率不同的混凝土小试件应力应变全过程曲线具有很好的相似性,峰值应力和峰值应变随应变率的增加有所提高,但弹性模量基本不变。林皋、闫东明^[32~34]分析了混凝土材料的动力特性及其在大坝抗震设计中应用的发展现状及其存在的问题。发现动荷载作用过程应变速率变化对结构的变形、应力大小与应力分布均发生影响。李庆斌等^[35,36]用大尺寸试件研究了全级配大坝混凝土在单轴拉伸与压缩荷载下的力学性能,试验发现,龄期增加,混凝土的强度、弹性模量及断裂能提高,龄期对极限应变和最大裂缝宽度的影响不明显。双曲线方程可以用于表述混凝土强度、弹性模量及断裂能等力学参数与龄期的关系。如吕培印、宋玉普等^[37~40]利用改进的液压三轴设备,对立方体混凝土试件在一向施加恒定侧压另一向施加动态的压缩、劈拉荷载,研究了双轴应力状态下的动态强度和变形特性。

吴胜兴等^[41,42]对小湾拱坝工程三级配混凝土动态弯拉力学特性进行了试验研究,得出了三级配混凝土试件动态破坏断裂面的粗骨料断裂数多于静态,初始静载对三级配混凝土动态极限弯拉强度影响很大,发现80%初始静载时动态弯拉强度提高最大;同静载相比,冲击加载时三级配混凝土具有动态极限弯拉强度提高、弯拉极限拉伸值变小、弹性模量提高不多、变形延迟等重要结论。

从试验的破坏现象上,许多学者(林皋^[34],Vegt^[43],周继凯^[42]等)发现,在高应变率下,裂纹穿过骨料的情况较多,并且会形成多个弥散性宏观裂纹分布,如图1-3以及图1-4所示。

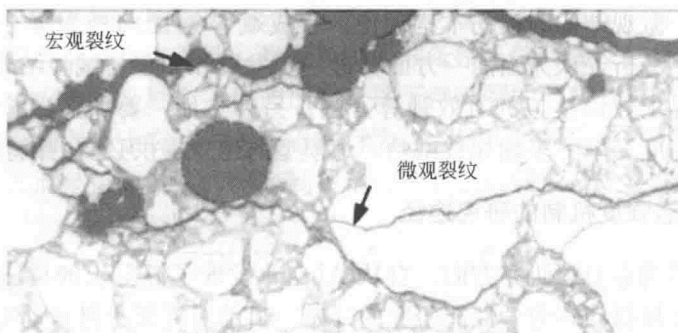


图1-3 细观裂纹扩展^[43]

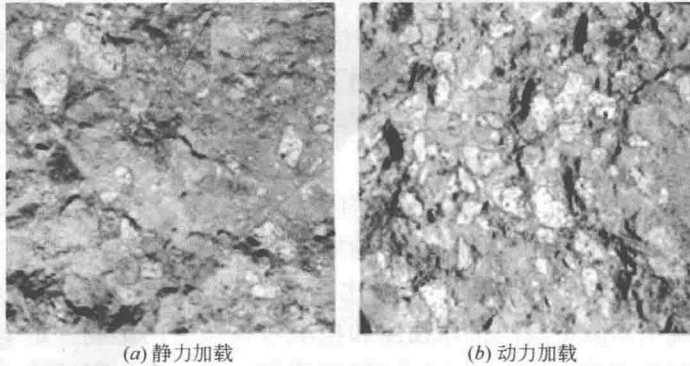


图 1-4 不同加载方式下骨料破坏现象^[42]

1.2.2 混凝土动态强度本构模型的研究现状

C. Allen Ross^[44]对混凝土单轴压缩应变率在 $10^{-7} \sim 10^{-3}/s$ 条件下采用标准材料试验机, 应变率在 $1 \sim 10^3/s$ 条件下采用分离式霍普金森杆 (SHPB) 进行冲击试验, 并采用有限元法模拟了混凝土裂纹形态, 数值模拟与试验结果有较好的一致性。Joseph W. Tedesco 在研究混凝土的 SHPB 冲击试验试件的裂纹形成过程中采用了高速摄影观察技术^[45]。吕培印^[46]利用大型混凝土静、动试验系统, 根据地震作用的速率范围, 进行了四种数量级加载速率下混凝土轴向压缩试验, 测得了混凝土动态强度、弹性模量、泊松比及应力应变关系, 建立了混凝土的动态本构模型。

近年来, 基于连续损伤力学, 国内一些学者建立了能够反映应变率效应的混凝土动态损伤本构模型。李兆霞^[47]建立了考虑应变率和损伤的混凝土本构模型, 认为峰值应力以前材料损伤依赖于塑性应变率和等效应力变化率, 峰值应力后损伤演化仅依赖于塑性应变率。李庆斌等^[48]根据混凝土动力加载和静力加载时混凝土应力应变曲线的相似性, 用几何方法构造了考虑材料率敏感性的动力损伤演化方程; 陈健云等^[49]在此基础上, 引入随应变率变化的损伤张量, 采用阈值修正的方法, 建立了各向异性损伤本构模型。基于连续损伤力学的动力损伤本构模型可以较好地描述材料的宏观动力特性, 但是材料损伤的形态及其演化过程是发生于细观层次的物理现象, 而损伤对材料力学性能的影响则是细观的成因在宏观上的结果和体现。因此, 需要运用宏、细观相结合的研究手段, 进一步探讨和建立材料的宏、细、微观结构的损伤本构理论。杜成斌^[50]对国内外混凝土材料动力本构模型研究进展进行了分析, 认为当前一方面要进一步发展和完善与试验结果较为一致的现有各种本构模型, 寻求数值模拟的有效计算方法; 另一方面, 要加强试验设备和方法的研究, 尤其是加强高应变率下多轴加载试验, 为模型的建立提供必要的试验数据。

1.2.3 混凝土动态强度机制的研究途径

在混凝土材料动态力学研究方面, 自从 Abram 发现了混凝土的抗压强度存在率敏感性, 标志着混凝土材料动态力学性能研究的开始。目前对混凝土材料动态力学性能的研究主要集中在宏观试验方面。混凝土理论宏观模型和试验在本质上没有能力去捕捉混凝土这类脆性非均质材料的非弹性变形和断裂的详细过程及材料非均质的随机性所产生的影响,

都缺少对混凝土动态强度提高的机制分析,也未能解释在高应变率下混凝土表现出与静态不同的破坏规律,如高应变率下破坏时产生更多弥散状分布式的裂纹,裂纹穿过骨料个数的增加等。这些破坏现象都与混凝土的细观结构密切相关。因此,要探索混凝土动态强度提高的机制,需要从混凝土的细观结构试验研究入手。

1.2.4 混凝土动态强度变化细观机制的理论研究

研究成果主要表现在混凝土动态强度变化的原因方面,理论方面的机理解释为^[51]:

(1) 能量耗散机理

目前国内许多专家依靠能量耗散理论对岩石材料进行了深入研究。谢和平等^[52~54]讨论了岩石变形破坏过程中能量耗散、能量释放与岩石强度和整体破坏的内在联系。指出岩石变形破坏是能量耗散与能量释放的综合结果。能量耗散使岩石产生损伤,并导致岩性劣化和强度丧失;能量释放则是引发岩石整体突然破坏的内在原因。喻勇等^[55,56]对花岗岩在不同加载方式下的能耗特征进行了研究。张志镇等^[57]进行了单轴压缩下的红砂岩能量演化试验研究。

高应变率作用下岩石的细观破坏过程研究对混凝土材料的动力强度机理研究有很好的启示和借鉴意义。这是因为,混凝土细观结构在一定程度上可以和岩石类比,骨料与岩石中矿物晶粒相当,硬化砂浆与岩石中的胶结物相当。另外混凝土材料的破坏从能量角度来看,也是由于裂纹的产生和发展而导致的,根据断裂力学观点,相对于裂纹发展所需的能量,裂纹形成的过程所需的能量远比裂纹发展过程中所需的能量高。加载速率越高,产生的裂纹数目就越多,因而就需要耗散更多的能量。

而目前现有研究只关注特定阶段的能量变化,如峰前或峰后的总能量,而较少研究变形破坏全过程的能量实时演化规律。因此研究破坏全过程的能量实时演化规律,有助于探索混凝土动载过程中损伤演化特征及其能量驱动机制、变形破坏形式与能量的相应关联、材料内部微细观结构与能量演化的相互作用等。

(2) 微损伤机理

从微损伤角度看,高应变率下混凝土材料内部同时出现两种效应,即应变率强化和损伤软化效应。在惯性效应的影响下,微裂纹需要时间来相互贯穿,损伤会出现滞后现象,而此时的强化效应却在提高。

(3) 横向的惯性围压效应

Bischoff^[58]认为动态压缩条件下控制强度和变形的破坏机理处于一种转变状态。这种变化是由于张裂对应变率有依赖性。静态单轴压缩条件下的行为受内部微破裂影响,其在性质上是张性的,方位上沿轴向。快速加载条件下微破裂的萌生和扩展的时间减小了,因此微破裂行为将影响混凝土在这种状态下的行为。或者说,压缩强度的快速增长不是材料的“真实”特性,而是由单轴应力状态到单轴应变状态的转变。

1.3 混凝土细观力学的研究

1894年国际理论与应用力学协会(IUTAM)在哥本哈根大会上将细观力学确定为“理论与应用力学中振奋人心的新领域之一”。细观力学已被国际力学界确定为当今固体力