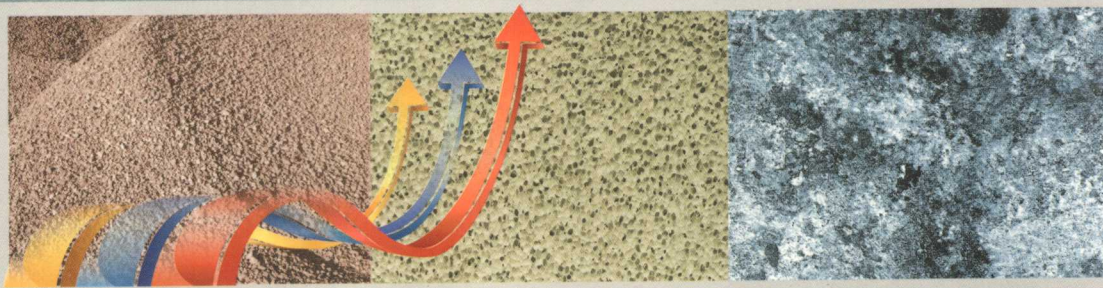


混凝土材料三点弯曲 细观数值试验



覃源 柴军瑞 党发宁 丁卫华 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

013048086

TU528.01
07

陕西省重点学科建设专项资金资助

混凝土材料三点弯曲 细观数值试验

覃源 柴军瑞 党发宁 丁卫华 著



TU528.01

07



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn



北航

C1655372

内 容 提 要

本书内容涉及混凝土材料细观力学研究的最新进展。第1章主要介绍了混凝土材料力学性能研究工作中遇见的各种问题,并对这些问题进行了分类和总结;第2章介绍了本书分析时采用的混凝土模型的建立思路以及建立方法,并将建成后的模型与传统意义上的模型进行了对比;第3章主要讨论了混凝土试件内部结构相同时,其力学性能随外荷载的变化而产生变化的规律;第4章讨论了混凝土试件内部结构不相同,在相同水平外荷载作用下,其表现出的力学性能的特点;第5章研究内容主要围绕在混凝土内部天然缺陷及其对力学性能的影响上;第6章主要介绍和分析了笔者所做的混凝土CT试验,包括试验设备的参数、试验步骤、成果分析等。

本书可供水工结构工程、岩土工程、土木工程、水文地质、工程地质等方面的专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土材料三点弯曲细观数值试验 / 覃源等著. —
北京:中国水利水电出版社, 2013.5
ISBN 978-7-5170-0649-7

I. ①混… II. ①覃… III. ①混凝土—建筑材料—材料试验—弯曲试验—数值试验 IV. ①TU528②TU502

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第099199号

书 名	混凝土材料三点弯曲细观数值试验
作 者	覃 源 柴军瑞 党发宁 丁卫华 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	175mm×245mm 16开本 9.25印张 210千字
版 次	2013年5月第1版 2013年5月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

对混凝土材料的研究是保证国民经济建设稳定安全发展的一个重要方面。随着经济、科技、人类观念等的不断发展,对住房、公路、桥梁、大坝等基础设施的需求量也日益加大,面临的技术难题也越来越多,混凝土材料的性能是一个复杂的科学问题,它不但与力学、数学、物理学等学科相关,还与化学、生物学等众多领域有联系,研究其力学性能必须结合当代的最新科技。

在混凝土材料力学性能的研究中,为了便于数学处理和实际应用,通常采用试验室试验和数值试验分析两种方法,这两种方法都对实际工程问题进行了不同程度的简化,由表及里、由浅及深的了解一些问题产生的机理和发展的规律,如混凝土构件强度的降低、裂纹(缝)的出现、耐久性的变化、表面和内部的腐蚀等。在实际工程中,这些现象不会单独存在,总是伴随着其他的现象一起发生,这就需要在科研当中能够更加清晰地认识到问题的根源,正确的分析,提出补救的措施。

从2006年起,笔者及笔者的老师先后对混凝土材料的力学性能进行了大量的数值试验分析和CT试验研究,本书就是对这些年来研究工作的系统总结,全书共分为6章。第1章主要介绍了混凝土材料研究工作中遇见的各种问题,并对这些问题进行了分类;第2章介绍了数值试验时采用的混凝土模型的建立思路以及建立方法,并将建成后的模型与传统意义上的模型进行了对比;第3章主要讨论了内部结构相同时,力学性能随外荷载的变化规律;第4章讨论了混凝土试件内部结构非均质性,对其力学性能的影响;第5章论述了混凝土内部天然缺陷及其对力学性能的影响;第6章主要介绍了笔者所做的混凝土CT试验,包括试验设备的参数、试验步骤、成果分析等。各章节之间相互联系,但是又相对独立,因此也适合于对本书部分章节感兴趣的读者阅读。

笔者对在混凝土力学性能研究领域作出贡献的学者和相关工程技术人员表示衷心的感谢,对一直关心研究工作的老师、同事和同行表示衷心的感谢,对所有的老师和学生(包括邓祥辉、许增光、徐维生、陈兴周、田威、梁昕宇、张忠云、张彦洪、汪彪、彭维东、陈山山、许刚、张丽丹、邢昂、孙超伟、温立峰、刘婷、冯璐、马超、刘钊、王玉才、吴江江、宁少庆、叶玉、杨雯惠、潘峰、雷光宇)在这领域的研究表示感谢,对为本书顺利出版提供过各种帮助的人表示感谢。

本书得到了陕西省重点学科建设专项资金资助,在此表示衷心的感谢,同时也得到了教育部博士点基金:离散裂隙网络水—岩—热—溶质运移耦合数值分析

(20096118110007)，西安理工大学优秀博士学位论文基金项目：细观结构对大坝混凝土稳定性影响的数值试验研究及工程应用（106-211108），以及陕西省重点科技创新团队的资助，在此一并表示衷心的感谢。

混凝土材料研究这门学科已经发展成为了一门交叉学科，有许多理论和实际应用问题需要进行进一步研究，由于各种原因书中不妥之处或者缺点在所难免，笔者愿与读者共同探讨、恳切希望批评指正。

著者

2012年12月

目 录

前言

第 1 章 混凝土材料研究概述	1
1.1 研究意义	1
1.2 研究概述	2
1.3 研究内容和研究方法	11
参考文献	14
第 2 章 数字混凝土模型	26
2.1 概述	26
2.2 混凝土随机骨料模型	28
2.3 模型的优化与改良	34
2.4 本章小结	36
参考文献	37
第 3 章 不同加载速率对混凝土材料力学性能的影响	40
3.1 概述	40
3.2 计算条件及参数	41
3.3 本构模型及损伤演化模型	42
3.4 计算模型的建立	43
3.5 数值模拟及分析	44
3.6 本章小结	57
参考文献	57
第 4 章 内部结构非均质性对混凝土材料力学性能的影响	60
4.1 概述	60
4.2 计算模型的建立	61

4.3	静荷载作用下的数值试验及分析	63
4.4	动荷载作用下的数值试验分析	72
4.5	非均质性对材料件静、动强度影响对比分析	81
4.6	加载历史对混凝土试件极限弯拉强度的影响	83
4.7	本章小结	85
	参考文献	86
第5章 内部缺陷对混凝土材料力学性能的影响		88
5.1	概述	88
5.2	混凝土模型内部缺陷的建立	89
5.3	缺陷混凝土模型的数值模拟	91
5.4	数值试验结果与声发射试验对比分析	97
5.5	纯动荷载下缺陷混凝土模型的计算精度	99
5.6	加载历史对缺陷混凝土模型极限弯拉强度的影响	101
5.7	本章小结	102
	参考文献	103
第6章 混凝土 CT 试验		105
6.1	概述	105
6.2	适用于医用 CT 机的便携式加载试验设备	111
6.3	仪器的调试	115
6.4	问题及解决	119
6.5	平均 CT 值	121
6.6	静力压缩 CT 试验	122
6.7	动力压缩 CT 试验	126
6.8	对比分析	129
6.9	本章小结	132
	参考文献	133
附录		137

第 1 章 混凝土材料研究概述

1.1 研究意义

土木建筑、水利工程、岩土工程、港湾建设、铁路以及公路等国家基本工程项目中都离不开混凝土。混凝土材料也是当今世界上用量最大、用途最广泛的工程材料,据统计我国 2011 年全国生产混凝土机械的总产量达到 43.6 万台,全国商品混凝土总产量达到了 14.2 亿 m^3 ,较 2010 年增长约 20%。可见在国民经济迅速发展的今天,混凝土材料已经成为了国民经济基础建设的重要工程材料之一。在实际工程中,由于对混凝土材料各项性能的不了解造成的工程隐患和工程事故屡见不鲜。例如辽宁省某地一幢四层办公楼,使用一年之后发现顶层主梁与次梁普遍出现斜裂缝,多数宽度大于 0.3 mm ,最宽处达到 1.5 mm ,裂缝位置绝大部分位于靠支座处和集中荷载作用点附近。根据调查这批梁是在冬季施工的,混凝土配料和搅拌质量较差,成型后受到冻害作用,原设计强度为 C20,两年半之后测定实际接近 15 N/mm^2 ,这给楼房的安全稳定性带来了巨大隐患。产生这个问题主要的原因是混凝土材料在低温下搅拌,使得搅拌效果大打折扣,同时冻害作用时混凝土梁强度进一步降低,梁上裂纹产生的主要原因就是混凝土强度低,抗剪强度不够所致,经过研究,发现采用结构胶粘贴钢箍板的方法可以有效抵抗剪应力作用,提高混凝土梁的抗剪强度。又如广东惠州市某学校教学楼工程为六层框架结构,建筑面积为 9080 m^2 ,抗震等级三级,基础采用静压预制应力管桩,基础及主体均采用强度等级为 C30 商品混凝土,运输距离为 5 km ,外墙采用 MU10 多孔砖,内墙采用 MU2.5 空心砖,约定工期 140d,结构封顶之后,施工单位对第四层竖向混凝土构件采用回弹法进行强度检测,发现回弹值不符合要求,在检测中还发现部分边桩承载力也不满足要求,存在一定的安全隐患。经过调查发现,生产该混凝土的厂家采用了缓凝减水外加剂,具有缓凝和减水双重功效,经检测不符合设计强度的桩均使用了过量的外加剂,导致强度严重降低,所以无法满足设计要求,必须要对其进行加固处理。如某单层工业厂房,跨度为 18 m ,采用预应力混凝土拱形屋架,混凝土设计强度等级为 C38。设计要求混凝土达到 100% 的强度时,方可进行预应力张拉。施工时,构件平放屋架采用三重叠生产,差不多 4d 可完成一榀屋架的支模,绑扎非预应力钢筋和浇筑混凝土工序。混凝土浇筑完毕、自然养护 28d 以后,施工单位开始穿筋、张拉预应力,

孔道灌浆。完成第一榀屋架的预应力工序时，发现屋架下弦在距端部 3.5m 被压酥破坏，而上弦在多处有折断裂缝。对此问题进行检查分析时发现，在龄期达标的情况下，预留混凝土试块抗压强度只有 24.7N/mm^2 ，为设计强度的 65%，这就是工程事故出现的直接原因，经调查发现运送石料途中，曾将石料堆与某化工厂的化工原料放在一起，该化工原料主要成分是 ZnO ，当吊装这些化工原料时，有部分 ZnO 粉末撒在了石料上，当这些粉末随石料掺和混凝土中进行搅拌时，就形成了 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ，这是一种两性氢氧化物，在水泥浆中呈现酸性状态，于是便于水泥中的氢氧化钙发生反应，导致水泥水化速度减缓，从而使混凝土在规定的龄期内没有达到设计强度。

从上述导致工程出现安全隐患的工程实例看出，混凝土建筑物出现安全问题是多方面的，有可能与混凝土搅拌均匀性有关，也有可能与混凝土材料的养护条件相关，同时冻害、地震、腐蚀等因素均会对混凝土构件的强度造成或多或少的影响，这些影响因素对混凝土材料的影响最终通过混凝土强度的改变体现出来，于是对混凝土材料各项性能的研究就成为了合理使用这种材料的关键。

1.2 研究概述

为了研究混凝土材料的力学性质，学者们开展了多种多样的物理、化学的试验，试验方案由简单到复杂，观察角度由外到内，观测尺度从宏观到微观，这些试验为研究混凝土材料的复杂力学性能和混凝土计算机数值模拟提供了宝贵的资料，这些试验主要有以下几方面。

1.2.1 尺寸效应

尺寸效应是指物体体积与承载能力之间的一种关系，尺寸效应的概念由威布耳^[1-2]最早提出，他认为试件体积的增加会导致其极限承载能力的下降，人们称这一理论为“威布尔最弱键理论”，它是根据大体积物体能够承受更多临界缺陷的理论提出的，该理论适合因疲劳而变脆的金属材料结构，但是在对混凝土这种天然非均质材料的研究中受到质疑。随后，Bažant^[3]提出了能量释放理论，这一理论能比较全面的解释类混凝土材料产生尺寸效应的机理，他认为宏观裂纹产生和发展时导致了混凝土材料中应力重分布现象的发生，此时储存在试件内部的应变能得到了释放，所以出现了尺寸效应。而 Carpinteri^[4]认为混凝土的尺寸效应主要与微裂纹或断裂的分形特性有关。在此之后人们对尺寸效应进行了进一步研究，发现物体的尺寸效应却是存在，Man^[5-6]运用三维混凝土梁网格模型研究了边长比为 1 : 2 : 4 : 8 的混凝土试件受力作用时裂纹的发展规律。Ince^[7-8]通过不同尺寸圆柱杆件和混凝土梁试件的拉裂数值试验确定混凝土试件在相应的体积下的破裂参数，及强度变化规律。Yi^[9]等对不同尺寸、不同形状以及不同骨料分布位置时，混凝土试件的强度变化规

律进行了数值模拟分析。在 Cedolin^[10]等的文章中详细讨论了通过尺寸效应数值试验,确定混凝土试件破裂参数的方法。在高强度混凝土的研究中 Viso^[11]通过对不同体积圆柱体和立方体试件的单轴压缩试验,分析了试件形状和尺寸的变化对高强度混凝土材料抗压承载力带来的影响,以及应力—应变曲线的变化规律。在对不同尺寸普通混凝土试件进行轴向冲击试验并结合数值模拟分析后 Elfahal^[12]发现不同尺寸的混凝土试件受冲击破坏时具有一定的时间效应,即尺寸效应受冲击荷载加载速率快慢影响较显著,这一结论的提出说明了混凝土材料的尺寸效应可以被分为动尺寸效应和静尺寸效应两类。党发宁^[13]等应用混凝土随机骨料模型,对混凝土材料的细观不均匀性进行模拟,并在此基础上通过改变模型尺寸,而不改变骨料尺寸的方法,分析了相同级配条件下,混凝土材料尺寸效应和强度之间的关系。

1.2.2 加载历史和率效应

相关研究表明混凝土材料动强度的提高与其率效应的存在有关^[14-15],在大多数的研究当中,人们总是简单地认为混凝土动强度较其静强度提高约30%,而加载历史、应变率等相关因素对其造成的影响却很少考虑,这就使研究结果出现了一定的不合理性。针对影响混凝土材料动强度因素的问题,肖诗云^[16-17]等从应变率效应入手,通过试验分析了混凝土材料在不同应变率下动力拉伸和压缩时材料的动强度变化规律,他们发现,随着应变率的增加,混凝土试件的抗拉、压强度都有所增加,抗压强度增长量高于抗拉强度增长量,弹性模量也随着应变率的增加而略有增加,泊松比没有随着应变率的不同而发生变化。周继凯^[18]等结合小湾拱坝的工程实例,对湿筛混凝土试件的率效应进行了研究,结合试验结果建立了湿筛混凝土静动态弯拉强度、弯拉弹性模量、弯拉峰值割线模量和抗弯极限拉伸值的计算公式,为率效应在计算机数值模拟中的实现提供了可靠的试验资料。马怀发^[19]等结合试验,采用混凝土二维有限元网格模型分析了在不同加载率下,混凝土材料强度率敏感性和弹性模量的率敏感性,初步揭示了动强度随应变率变化的规律,并且提出混凝土材料动强度的变化除了与应变率相关之外,还与加载历史等其他因素有关。Zheng^[20]等基于裂纹演化模型,结合混凝土动态轴向压缩试验,分析了混凝土材料在不同应变率下的动强度增加系数和微裂纹的存在对动强度增加系数的影响规律。Zhou^[21]等基于 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 模型建立了二维混凝土随机骨料模型,并对高应变率下混凝土试件发生拉伸破坏的机理进行了探讨,结果表明,高应变率下,试件裂纹的形态受到骨料分布位置的影响很大,同时还发现,骨料和砂浆之间的界面单元的力学参数对试件抗拉强度的影响很大。Grote^[22]和 Park^[23]等通过试验和数值模拟相互验证的方法,研究了混凝土材料的动力特性,研究的主要内容包括,极限荷载承受力,能量吸收力以及细观结构的影响能力等。Weerheijm^[24]通过试验得到了混凝土试件在受到强冲击荷载(爆炸、碎片冲击等)作用时动抗拉强度的变化规律。

1.2.3 混凝土 CT 试验

混凝土 CT 试验是无损检测混凝土内部损伤分布的试验之一,其优点在于,可利用高精度 CT 扫描仪器对试件内部进行扫描,扫描区域覆盖整个混凝土试件,无论破坏区域发生在试件哪个部位,均可以得到该裂纹区域的 CT 图像,为研究混凝土内部损伤发展提供了可靠依据。近几年,越来越多的学者已经将混凝土 CT 技术和计算机数值模拟相结合,实现了裂纹分析、损伤演化过程的数字化。在混凝土及类岩石材料的 CT 试验方面,葛修润^[25]、任建喜^[26]等最先研制了与医用 CT 机相配套的岩石专用加载设备,并利用该设备对岩石进行了单轴、三轴荷载作用下煤岩破坏全过程的实时动态检测,得到了岩石内部裂纹萌生、发展、贯穿等阶段的 CT 图像。杨更社^[27]利用 CT 技术对岩石细观损伤本构模型进行了研究。丁卫华^[28-32]在对岩石进行 CT 试验的过程中,提出了密度损伤增量的概念,采用宏观轴向应力与密度损伤增量结合的方法,分析了岩石细观损伤演化过程。并且提出可以根据 CT 图像上的 CT 值计算得到岩石受力损伤过程中任意应力阶段和任意区域岩石密度的损伤增量。在随后的研究中^[33]他推导出了岩石密度损伤增量公式,岩石体应变公式以及岩石内部裂纹普遍适应性公式。近几年,基于岩石 CT 技术,陈厚群^[34-35]和丁卫华^[36-38]等首先研制出适用于医用 CT 机的便携式混凝土材料试验机,经过多次调试,最终成功的对尺寸为 $\phi 60\text{mm} \times 120\text{mm}$ 的 C15 混凝土试件进行了动态拉、压试验,并且能够对 $\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的 C25 混凝土试件进行动态拉伸试验。在之后的工作中丁卫华^[39]还对 CT 扫描得到的图像进行了多种方法的几何校正,从而得到了清晰度更高的混凝土 CT 图像。刘彦文^[40]采用 X 射线 CT 实时扫描混凝土试件,测定混凝土试件从加载直至破坏的全过程应力—应变曲线,为宏观和细观力学分析计算中的材料本构关系提供依据,并根据试验结果分析了各个混凝土破坏过程中裂纹形态和演化规律的差异。周尚志^[41-42]等在对混凝土 CT 图像进行分析的基础上,将混凝土 CT 扫描图像分为了安全区、损伤进行区和破损区,并对分区损伤进行了量化描述,在随后的研究中还对混凝土破裂的分形特性进行了讨论。田威^[43-45]在 CT 图像的分析中引入了支持向量机的理论,对混凝土圆柱体试件一个扫描断面的 5 个应力阶段的 CT 图像进行了分析,同时他还利用实时扫描得到的 CT 图像对混凝土受力损伤演化过程进行了分析,并将分析结果通过随机骨料模型在数值模拟中成功实现。梁昕宇^[46-47]等利用 CT 技术对单轴压缩作用下混凝土细观破裂过程进行实时扫描观测,基于 CT 图像采用分形几何中的差分盒维数法计算出不同扫描断面不同应力阶段的 CT 图像分形维数,并对其特征进行了讨论。尹小涛^[48]从数学生态学种群概念入手,在 CT 尺度范围内考察了混凝土某一特定扫描断面的 CT 图像,确定了骨料、砂浆和裂纹这三个种群的特点,并成功提取具体信息,在此基础上总结了混凝土损伤演化的机理。李芬^[49]利用 CT 技术对沥青路面芯样进行了轴向压缩疲劳试验的检测,并分析了沥青混凝土材料受压力作用时的损伤演化特征。戚永乐^[50]提出了一种

基于 CT 数字图像技术的混凝土材料三维有限元模型构建的新方法,建立真实状态下的混凝土细观数值分析模型,并对钢纤维混凝土进行了劈裂试验,对比试验结果发现采用新方法建立的数值混凝土模型的计算结果与试验结果相吻合。郭东明^[51]对高强混凝土裂纹扩展规律进行了 CT 试验研究,在试验的基础上获得了载荷强度、裂纹扩展及分形维数三者之间的关系。高英力^[52]对国内外工业 CT 层析扫描技术在混凝土微结构研究中的应用情况进行深入分析调查,总结了该技术在混凝土微结构无损检测中的应用特点。刘汉昆^[53]在混凝土 CT 试验的基础上,利用 MIMICS 软件对 CT 扫描图像进行三维重构,得到了基于 CT 图像的混凝土三维几何模型,并将模型信息导入了 ABAQUS 软件中进行数值计算,对比发现数值模拟结果与试验结果较相似。赵亮^[54-55]基于信任传播算法,并将此算法扩展到多尺度上,对混凝土 CT 图像进行分割处理,从而反映出混凝土材料内部的结构特征和缺陷,为混凝土应力分析提供了一种新的辅助手段。王振军^[56]将混凝土 CT 技术与电子显微镜相结合,分析了相同集料级配条件下,不同水泥和乳化沥青结合料用量混凝土试件的特定层位空隙数量、空隙尺寸和空隙率,并对其变化规律的机理进行了分析研究。秦武^[57]基于混凝土 CT 图像的切片对混凝土试件进行了计算机三维重构,研究了单元属性控制因素,提出更精确的单元属性识别判断准则,并对该模型进行了数值模拟计算。

1.2.4 声发射试验

声发射试验也是目前检测材料内部缺陷的无损检测手段之一^[58-65],它在混凝土材料检测中最早于 1959 年被 Ruskh^[66]提出,和其他材料的声发射机理类似,混凝土材料产生声发射的原因是在受荷载作用时,晶体的移动、弹性变形、塑性变形以及裂纹的产生和扩展等。随着科学技术的发展,声发射技术也在过去的基础上得到了发展,它已经被众多科研领域所应用,例如材料学、断裂力学、地震学以及岩石力学等。与其他无损检测方法相比较,声发射法具有很多优点:①声发射属于动态检测法,它可以在试件受力发生变形时进行实时检测,从而利用声发射法往往能捕捉多试件内部裂纹萌生、发展以及贯穿的全过程;②可以对试件内部缺陷随荷载、时间、温度等变化的详细信息反映到试验的结果中,从而再现内部缺陷在试验过程中的详细变化规律;③可以在苛刻的检测条件中完成任务,例如:高辐射、高温、低温、化学污染等;④检测时试件形状、组成材料不受约束,检测灵敏度高。基于声发射试验的原理,纪洪广^[67-69]等通过混凝土材料声发射动态检测试验,定量的描述了声发射时的特征函数,以及与损伤参量之间的关系,利用声发射参数表示了基于声发射试验的损伤演化方程和本构方程。实现了声发射与应力—应变参量的耦合,通过声发射的分形特征,建立了声发射分形函数,并对此分形函数随损伤发质的规律进行了分析,吴胜兴^[70]等对混凝土材料静态拉伸时,声发射现象的相关参数进行了研究。王立燕^[71]等应用声发射试验对橡胶混凝土的疲劳损伤过程进行了研

究。朱宏平^[72]等利用声发射信号与速率过程理论,并对 Kaiser 效应和 Felicity 效应进行了分析,对混凝土芯样的损伤过程进行了定量的评估。宗金霞^[73]等利用参数法分析了声发射参数累计能量、计数和撞击等参数与混凝土试件损伤状况之间的关系,并验证了该方法的可行性,同时通过对钢筋混凝土梁在受荷载作用时的开裂过程进行了有限元数值模拟分析,发现数值模拟结果与声发射试验结果具有相似性。基于声发射试验 Ohno^[74]对混凝土破坏程度进行了量化分类,并进行了数值模拟分析。

1.2.5 超声波检测试验

在无损检测方法当中,理论最为成熟的要数超声波检测技术。它的原理是利用声学参数的变化反应物体内部结构的变化特征,目前这项技术在混凝土无损检测和相关的试验当中已经发展了近 70 年之久,利用超声波检测技术可以在无损的状态下检测出混凝土材料内部的孔洞和裂纹的分布、位置、体积大小等相关信息,并通过声学参数反应在测试结果当中^[75-83]。在使用超声波对物体进行检测时,有两种检测方法,一种是穿透检测;另一种是反射检测,在对混凝土材料的检测中,使用的是穿透检测法,它的原理是^[84]用一个发射换能器重复发射超声脉冲波,让超声波在所检测的混凝土中传播,和 CT 扫描原理相似,当超声波穿透试件内部时,它会以声学参数的形式记录下试件材料的相关信息,例如:骨料位置、孔洞位置、孔洞尺寸、裂纹长度等,并由接收换能器接收穿出的信号,然后该信号被转化为电信号传递给超声放大器,随后对接收到的信号进行采集并最终显示在计算机上。朱金颖^[85]等对混凝土试件在单轴向压力作用下超声波速、幅值及主频的变化规律进行了分析研究,结果表明,波速对混凝土试件中的应力变化敏感度较低。程朝霞^[86]等对超声波检测混凝土强度的发展状况进行了综述,并根据这些研究进展提出了超声波检测中面临的几个难点问题。李俊如^[87]等利用超声波单面平测法检测混凝土结构裂缝的深度,并由裂缝深度检测结果评价了混凝土裂缝的影响范围,分析了产生混凝土裂缝的机制。商涛平^[88]利用超声比技术检测了混凝土试件表面损伤层的厚度,在结果分析时采用回归分析法代替了传统作图法,并且得出当试件内部存在钢筋时,对检测结果有一定影响的结论。王五平^[89]利用超声波 CT 技术探测了混凝土试件的内部缺陷,利用所编制的超声波 CT 程序对具体工程中遇到的桩基础的一段进行层析成像,给出了测区混凝土超声波 CT 成像图等值线和色谱图,据此确定质量异常区的位置、尺寸,从而推断出桩基础内部的缺陷。董清华^[90]对 2005 年以前的混凝土超声波技术以及超声波检测技术进行了阶段性综述,为接下来更好地开展研究作出了贡献。王山山^[91]等通过超声波检测法,检测了在动态荷载作用下常规混凝土试件和冻融混凝土试件产生损伤和破坏的过程,并通过声学参数评估了试件的损伤和破坏程度。张永乐^[92]应用超声波检测仪对预制混凝土试件进行了检测,从检测结果中发现,超声波在无缺陷混凝土中传播规律服从正态分布的特征。李志强^[93]在综述中全面回顾了国内外超声波无损检测技术的发展情况,阐述了超声波检测在混凝土工程应用中

存在的问题,着重介绍了混凝土超声波无损检测原理,并探讨了超声波无损检测技术的发展趋势。

1.2.6 三点弯曲试验

三点弯曲试验是目前用来检测混凝土试件抗弯拉特性最常用的试验之一,试验时试件平放于弯曲试验夹具中,形成简支梁形式,支撑试样的两个下支撑点间的距离视试样长度可调,而试样上方只有一个加载点。试验过程中通过改变荷载大小、频率等相关参数达到考察分析被测试件抗弯拉强度的目的,这个试验的过程已经在物理试验和数值模拟两方面得到了成功的实现。王学滨^[94]采用解析方法在考虑应变梯度效应的情况下对混凝土三点弯梁的裂纹带、局部应变分布等进行了研究,得到了位移与拉应变之间的关系,以及拉应变局部化区域的扩展规律。在2009年前后,在充分考虑了混凝土材料抗拉强度及峰值后软化曲线非均质性的前提下,他们还采用FLAC模拟了混凝土梁三点弯曲条件下的破坏过程^[95]。郑光俊^[96]对三点弯曲试验所得的试验数据进行比较分析,并用Matlab软件对试验结果进行函数图像分析,建立了计算混凝土材料断裂韧度的公式。魏显峰^[97]提出了混凝土裂纹处存在钢筋的力学分析模型,并对少筋混凝土梁三点弯曲断裂过程进行了数值模型分析,研究发现配筋率对裂纹的形成、发展以及裂纹的行具有很大的影响。庄法坤^[98]通过了三点弯曲小试样材料蠕变性能试验,测试了试件的蠕变性能,并在此基础上建立了三点弯曲同传统蠕变试验的解析关联式。周继凯^[99]对尺寸为300mm×300mm×1100mm的三级配混凝土试件进行了三点弯曲试验,并分别进行了静荷载、动荷载以及有预静载的动荷载这三种工况的力学试验,结果表明,试件在单一动荷载作用下,动极限强度比静极限强度提高了25%,而当试件受到预静载作用后,再承受动荷载作用时,试件的静动综合弯拉强度提高量比单一动荷载时更高。Park^[100]等应用Cohesive fracture模型对纤维混凝土的三点弯曲试验进行了模拟,并对纤维混凝土的断裂特点以及纤维增强能力进行了研究,结果表明该模型在模拟纤维混凝土损伤和破坏特点上具有比别的混凝土模型优越之处。Xu^[101]采用带有凹槽的混凝土梁进行三点弯曲试验,并从能量学的角度分析了裂纹发展规律,同时计算了试件的断裂参数。Chaimoon^[102]从试验和数值模拟两个方面考察了砖砌梁在三点弯曲试验中的断裂特性,随后通过改变砖砌混凝土梁填充砂浆的强度,在此研究了试件发生断裂的部位和裂纹的形态。Chen^[103]将声发射试验和三点弯曲试验相结合,研究了凹槽混凝土梁底部受拉区凹槽深度与声发射现象之间的关系,研究发现,当凹槽的深度对声发射影响非常显著,凹槽深度越深,声发射现象越少。Carneiro^[104]对钢筋混凝土试件的断裂韧性、强度和影响动强度增长的因素进行了三点弯曲试验研究,发现钢筋混凝土试件的抗压强度受混凝土自身能量吸收能力的影响非常显著。

1.2.7 分离式霍普金森压杆试验

分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)试验已经有60

多年的研究历史，它是研究高应变率下混凝土材料力学特性的重要试验，1914 年，Hopkinson 就提出了压杆技术，实现了测试瞬态脉冲应力，1949 年 Kolsky 改进了 Hopkinson 装置并提出了分离式 Hopkinson 装置。通过此装置可以测定材料在一定应变率范围的应力—应变行为，该技术的理论基础是一维弹性应力波理论，它通过测定压杆上的应力推导试样的应力—应变关系，该试验被广泛地应用于分析混凝土、岩石、陶瓷及其他松散材料的动态力学性能^[105-109]，由于在 SHPB 试验中可以实现高应变率荷载的施加，所以它常常被用来测试混凝土受子弹、爆炸等快速荷载作用时的力学特性。除了试验室试验以外，SHPB 试验的过程也已经被学者们通过计算机模拟出来。张育宁^[110]采用变截面大尺寸分离式霍普金森压杆试验，对于抗压强度等级分别为 50MPa 和 90MPa 的高强高掺量钢纤维混凝土试件，进行了中应变率下的动力试验。张志刚^[111]利用 $\phi 100\text{mm}$ 霍普金森压杆试验设备，研究了混凝土材料在冲击荷载下的动态压缩性能，分析试样中应力均匀性问题，结果表明，在高应变率下混凝土这种敏感性材料的应力—应变曲线呈非线性分布。赵碧华^[112]利用直径为 $\phi 74\text{mm}$ 的变截面 SHPB 装置对含有超短钢纤维混凝土进行冲击压缩试验，研究结果表明，随着钢纤维含量和应变率的提高，材料的动态强度显著增加。曹吉星^[113]采用显式动力有限元软件 LS-DYNA 模拟了 C100 与 C80 高强混凝土 SHPB 试验过程，并分析了混凝土试件应力均匀性问题，得出混凝土试件在接近破坏的前一段时间内，应力出现了不均匀现象。蒋国平^[114]通过 SHPB 试验得到压杆中入射波与透射波应变随时间变化的时程曲线，求得在不同应变率条件下被测混凝土材料的应力—应变的关系，得到了混凝土材料在冲击荷载下损伤因子的变化，确定了影响损伤因子变化的参数，焦楚杰^[115]在随后的研究中将 SHPB 试验与数值模拟分析结合在一起，经过分析发现，混凝土试件内部的应力波经历了多次来回震荡后逐渐趋于稳定，试件的破坏之后与其峰值强度。朱珏^[116]在 SHPB 试验中测量了断裂应变很小的混凝土类材料，研究发现采用不同加卸载时，应力幅值对于试样中应力均匀性没有影响，但对试样中应变和应变率的大小有影响。贾彬^[117-118]等对混凝土试件在常温（16℃）到高温 650℃ 时进行了 SHPB 试验，并通过对试验结果的分析得知，混凝土材料的高温动强度与加载速率成正比，与温度成反比的规律，同时基于混凝土 HJC 动态本构模型，通过 LSDYNA 软件对混凝土试件的正 SHPB 试验进行了模拟，再现了试件在 SHPB 试验中力学性能的变化规律。李志武^[119]等也将高温后混凝土 SHPB 试验作为研究对象，对经历常温、200℃、400℃、600℃、800℃ 的混凝土试件进行了高速率冲击试验，分析弹速、温度对平均应变率的影响规律以及温度、平均应变率对动态抗压强度的影响规律。巫绪涛^[120]通过运用 HJC 动态本构模型对 SHPB 试验进行了数值模拟分析，解决了罚函数算法中罚因子合理数值的选取问题。李为民^[121]采用 $\phi 100\text{mm}$ SHPB 试验装置，对试验中的关键问题—应力的均匀分布性进行了试验研究，并在总结试验结果的基础上对 $\phi 100\text{mm}$ 碳纤维混凝土在不

同应变率下的冲击压缩力学性能进行了分析。丁国博^[122]对早强 EPS 混凝土试件进行了 SHPB 试验, 试验时试样选取龄期分别为 12h、24h、36h 和 28d 的 EPS 混凝土试件, 结果表明, 龄期在 12h 和 24h 的动强度和能量吸收能力随应变率的增加变化不显著, 而龄期为 36h 和 28d 的混凝土试件动强度和能量吸收能力随应变率的改变有明显的率效应存在。何远明^[123]等对高温下 SHPB 试验中的应力—应变等性能进行了详细研究, 发现除 200~300℃ 范围外, 高温下混凝土具有显著的应变率效应, 且温度越高动态应变率效应越显著。

1.2.8 劈裂试验

劈裂试验是指用圆柱形试样在直径方向上对称施加沿纵轴向均匀分布的压力使之破坏, 从而测定试样强度的一种试验方法。在水利工程中, 经常提到水力劈裂的概念, 它是指水压力的抬高在岩体或土体中引起裂缝发生与扩展的一种物理现象。劈裂试验目前主要应用于描述工程材料在工作期间所受到的损伤, 是评估其可靠度、耐久性等指标的重要依据^[124]。易成^[125]等对普通混凝土和纤维混凝土试件进行了劈裂试验, 结合试验结果对一些损伤模型中存在的问题进行了讨论分析, 他认为不论普通混凝土还是纤维混凝土, 其卸载曲线的斜率受到粗骨料和纤维等因素的干扰, 卸载刚度的衰减不能精确描述损伤的演化, 所以损伤描述应该具有不同的形式, 故此根据试验结果提出了描述混凝土材料卸载时的损伤表达式。贾金生^[126]设计了混凝土试件高压水劈裂模拟试验, 进行了一次模拟无拉、压应力作用下混凝土结构的水力劈裂问题, 并将试验结果用来校正分析了数值模拟结果的可信度。高丹盈^[127]通过对尺寸分别为 100mm×100mm×100mm 和 150mm×150mm×150mm 的高强混凝土和钢纤维、聚丙烯纤维高强混凝土试件的劈拉试验分析了纤维掺量和纤维类型对高强混凝土劈裂和其他相关力学性能的影响, 并提出了劈裂强度和增强系数的关系式。李宗利^[128-129]认为自然条件下的水力劈裂边界条件与人工致裂不完全相同, 并将水力劈裂研究分为岩体宏观综合水力劈裂和单裂纹的水力劈裂研究两种, 提出了不同阶段裂纹内水流运动分析的模型。李平先^[130-131]采用新老混凝土黏结复合立方体试件, 通过快速冻融试验, 对在界面剂和新混凝土中掺加引气剂的老混凝土黏结面的冻融劈裂抗拉性能进行了试验研究, 探讨了冻融循环次数、引气剂、黏结面粗糙度和界面剂类型等对黏结面劈裂抗拉强度的影响, 研究发现, 适当的粗糙度和掺加引气剂的水泥砂浆界面剂对新老混凝土黏结面的抗冻融性能有较好的改善作用。项凯^[132]对高温后 C35 混凝土试件进行了劈裂抗拉强度试验, 并结合最高温度、恒温时间和冷却后混凝土的抗拉强度变化进行了公式拟合, 研究发现高温和高温恒温作用对混凝土材料抗拉强度影响显著。胡俊^[133]根据王启智^[134-135]所做的巴西圆盘力学性能试验, 采用 SHPB 试验对聚苯乙烯混凝土试件进行劈裂强度测试, 分析了聚苯乙烯混凝土试件的劈裂破坏形态, 研究表明, 聚苯乙烯混凝土的劈裂强度与应力率成正比, 且在试验中表现出一定的粒子效应。周红^[136]等对混凝土立方体与圆

柱体试件的劈裂抗拉强度进行了尺寸效应方面的研究,建立了基于 Weibul 统计强度理论的混凝土劈裂抗拉强度尺寸效应计算公式,并讨论了骨料粒径对尺寸效应的影响。张东煊^[137]对 2 种不同切口尺寸的钢纤维混凝土试件进行了楔入式劈裂断裂电测跟踪试验,得到了载荷—位移曲线、载荷—开裂位移曲线以及断裂区变形—荷载强度曲线,并通过应力强度因子对试件的承载能力进行了理论计算,发现计算结果与试验相吻合。

1.2.9 冻融试验

由于温度周期性的发生正负变化,使材料发生冻胀、变形等一系列变化的过程叫做冻融。混凝土的抗冻性能是其耐久性的一项重要指标,同时也是一项综合性能指标。水工混凝土的设计指标中经常用抗冻性指标代替其耐久性指标,Mehia 指出^[138]混凝土破坏原因,按重要性递减顺序排列是:钢筋锈蚀、冻害、物理化学作用。混凝土的冻融破坏作用主要有冻胀开裂和表面剥落两个方面。我国混凝土材料最易发生冻融破坏的去主要在东北、华北、西北地区。尤其是在东北严寒地区,为了了解冻融破坏的机理,寻找出处理冻融破坏的最佳方案,国内外科学家已经对次问题开展了多年的研究工作,部分工作已经能够通过计算机程序实现。李金玉^[139]通过快速冻融试验分析了混凝土水饱和状态下,发生冻融破坏的机理,并提出混凝土冻融破坏过程是一个物理破坏过程的观点。宋玉普^[140-142]利用大型混凝土静、动三轴试验系统,对经过 0 次、25 次、50 次、75 次冻融循环的混凝土进行了双轴压缩试验,随后他还对冻融循环后引气混凝土双轴破坏准则进行了试验研究,建立了冻融循环后混凝土双轴压的破坏准则,在此基础上分析了混凝土冻融损伤的可靠性,并推导出冻融损伤过后,混凝土剩余寿命的计算公式,为北方寒冷地区的水坝、混凝土路面等的设计、分析提供了试验及理论依据。任慧韬^[143]采用快速冻融试验方法,研究了冻融循环对玻璃纤维布材料、玻璃纤维布与混凝土黏结强度的影响,同时也研究冻融循环对玻璃纤维布加固混凝土梁受力性能的影响。唐光普^[144]建立了冻融混凝土在主应力空间内实用的破坏面演化模型,并以此为依据,应用损伤力学方法量化冻融造成的损伤并建立演化方程。刘学波^[145]对经过不同冻融循环次数作用后的湿筛大骨料混凝土试件和三级配大骨料混凝土试件表面破坏形态进行了研究,并基于湿筛大骨料混凝土试件进行了不同冻融循环次数后的单轴压缩、单轴拉伸和双轴压缩试验,分析了试件的破坏形态。张士萍^[146]文对目前混凝土冻融破坏研究新进展进行了综述,介绍了已有的关于冻融破坏机理的几种假说,同时论述了孔结构、饱水度、含气量和环境条件对冻融破坏的影响,国内外冻融循环试验方法和判据以及预防冻融破坏的措施。刘西拉^[147]利用混凝土冻融标准试验数据模拟现场冻融环境下混凝土的冻融过程并给出了冻融耐久性预测分析的方法,并结合现场实测气温资料模拟现场混凝土冻融过程,建立能够联系实验室冻融和现场冻融的等效室内冻融循环次数公式,提出利用等效室内冻融循环次数和标准冻融试验数据预测现