

## 混凝土破坏理论研究进展

郭少华

西安冶金建筑学院 (邮政编码710055)

**提要** 本文综述了混凝土的材料性质、破坏特点及机理,回顾了断裂力学与损伤力学在混凝土材料破坏研究中的应用,对当前混凝土破坏研究的主要问题和今后方向进行了讨论与展望。

**关键词** 混凝土破坏; 界面裂纹; 细观力学; 本构关系; 损伤; 断裂

### 1 引言

混凝土作为一种建筑材料,已经有100多年的应用历史,随着科学技术水平的提高和生产力的发展,混凝土的应用模式、应用环境已由单纯房屋建筑等简单结构逐渐扩大到像海洋石油钻井平台、高拱坝以及核电站预应力混凝土保护层等复杂应用环境下的复杂结构。无论是这些复杂结构将要出现的破坏形态,还是常见的建筑物,如桥墩、房基、烟囱等工程裂纹问题,都成为建筑工程中急待解决、而又非常棘手的问题。

混凝土结构由于应力作用而损伤断裂破坏,这种作用应力分为内部应力和外部应力二类。内部应力是因混凝土的泌水作用、干燥收缩、水化热,以及外部环境条件,如温度、湿度变化、化学腐蚀作用等,使材料内部组织产生变化而伸缩,后又因结构约束(外部约束)和组构约束(内部约束)的作用而造成。混凝土的开裂就是为了缓和这些内部应力的作用。外部应力是由于地震、风力、静动载荷以及不均匀地层下陷等作用造成。它们是混凝土结构损伤断裂发展直至破坏的主要驱动力<sup>[1]</sup>。

混凝土材料最大的特点是它的多相性质。从研究破坏的角度出发,一般可以将混凝土结构分为3级。第1级,即混凝土,可将砂浆视为基相,骨料视为分散相。骨料和砂浆的结合面为薄弱面,该处常因各种原因产生结合缝。混凝土的破坏首先从这里开始。第2级,即砂浆,可将水泥视为基相,砂视为分散相。砂和水泥的结合面也是薄弱面,也产生结合缝,但其尺寸比砂浆和骨料之间的结合缝至少小1个量级。第3级,即硬化水泥浆,硬化水泥浆也不是均质材料,其中包裹着一些未被水化的水泥颗粒及孔隙,它们就是缺陷。因此,可将硬化水泥浆胶体视为基相,将这些缺陷视为分散相。水泥浆体的破坏可能从这些缺陷开始,裂纹由于克服硬化水泥浆分子间的引力而扩展。未被水化的水泥颗粒尺寸通常比砂和水泥浆的结合缝至少小几个量级。

由于混凝土具有这种多级多相的组织结构; 所以其力学性能受到基相、分散相以及界面结合强度的综合制约和影响。又由于这种组织结构的各级结合缝的不同量级尺寸, 在同样应力状态下, 骨料和砂浆的结合面必先发生裂纹扩展, 其次是砂和水泥浆的结合面开裂, 最后裂纹进入硬化水泥浆。这一过程的发展决定了混凝土材料的破坏必然是一个较长的结构变化过程。

很多研究结果都表明<sup>[2,3]</sup>, 混凝土的破坏是结合缝的产生、闭合、扩展、分叉、聚合和失稳扩展过程。对一般结构来说, 这一过程大致要经历3个阶段: ①弥散化阶段, 遍布结构内部的所有微裂纹都很活跃, 并处于独立的发展状态; ②集中化阶段, 只有部分区域的微裂纹较为活跃, 并出现贯通趋势或已经贯通, 而其他部分的微裂纹则发展缓慢, 甚至休止; ③局部化阶段, 应力超过粘着应力峰值后, 微裂纹集中在某一局部区域内发展, 并进一步贯通, 形成宏观大裂纹。此时, 结构的性能主要由1条或几条宏观大裂纹控制, 变形则主要集中在大裂纹上, 裂纹以外的区域则卸载, 表现出强烈的各向异性。

## 2 断裂力学与损伤力学在混凝土破坏研究中的应用

混凝土材料及破坏的上述特点决定了传统混凝土强度理论, 如Mohr-Coulomb理论、剪应变能理论、极限拉应变理论以及Griffith强度理论, 在一定程度上不能满足强度设计要求。60年代以后, 人们开始将断裂力学和损伤力学等新的破坏理论应用于混凝土破坏研究中。

最早将断裂力学用于混凝土研究的是Kaplain<sup>[4]</sup>。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<sup>[5-7]</sup>。但是由于没有弄清混凝土断裂破坏的特殊性质, 所以导致了很多相互矛盾的结果。许多研究发表的混凝土断裂韧度的测定值, 其可变性已经引起很多学者对线弹性断裂力学能否应用于混凝土材料的怀疑。例如, Glucklich<sup>[8]</sup>证明, 临界应变能释放率要比混凝土的表面能的2倍大得多。其他越来越多的试验结果也表明, 混凝土的 $K_{Ic}$ 值随着试件尺寸的变化而变化, 并与裂纹长度和相对缺口深度有关<sup>[9,10]</sup>。不仅如此,  $K_{Ic}$ 还随骨料体积、形状、水灰比和龄期的不同而不同<sup>[11,12]</sup>。后者由于材料性质的变化而引起 $K_{Ic}$ 的变化。单就尺寸变化引起的 $K_{Ic}$ 的不同结果, 就值得怀疑线弹性断裂力学对混凝土的适用性。然而, 随着近年来对大尺寸混凝土试件( $h > 2m$ )实验结果的分析<sup>[13,14]</sup>, 人们已经认识到, 以往对混凝土断裂参量的测定, 实际上并不真正代表混凝土的断裂韧度, 而仅仅是名义值。由于混凝土复杂的组织结构, 只有在试件尺寸大到一定程度后<sup>[15]</sup>, 才能够测定出不随尺寸而变化的稳定的 $K_{Ic}$ 值, 这才真正反映了混凝土的断裂韧度。但是大尺寸混凝土实验比较困难, 一般实验室难以做到。

有关混凝土断裂的研究分为两类, 一类是用线弹性断裂力学中的参量表示混凝土的断裂韧度特性, 另一类则着重研究裂纹形态和断裂表面, 以了解材料不均匀性对裂纹的影响。

混凝土裂纹几何形态远远不同于金属材料, 其特点是: ①有效裂纹的几何尺寸无法准确度量, 因为混凝土断裂不再是单一裂纹的增长, 而是众多裂纹的成核过程。其有效裂纹面积大大高于单一裂纹面积。②裂纹顶端的位置无法准确确定。因为混凝土从微裂纹过渡到宏观裂纹, 其间没有明显的区分点。

混凝土材料从开裂到断裂始终都不是线弹性的, 也不是真正均质各向同性的<sup>[10]</sup>。由于不符合线弹性断裂力学中的许多假定, 需要研究怎样模拟混凝土断裂。混凝土应力应变间的

非线性关系意味着它在完全破坏前,一直存在裂纹缓慢发展和局部材料的损伤。每当载荷或材料损伤增大时,都应做应力和破坏分析。因此,无论是多裂纹模型还是单一裂纹模型,混凝土的亚临界裂纹扩展阶段都不能忽略。

考虑到混凝土裂纹的这些特点,以及线弹性断裂力学遇到的困难,人们提出了不少混凝土断裂破坏的非线性分析方法及模型。归纳起来有:①阻力曲线法<sup>[17]</sup>。研究表明,混凝土的阻力曲线不随尺寸的变化而变化。②裂纹端微裂区模型<sup>[18]</sup>。该模型预测出,混凝土裂纹端部存在类似于金属材料裂尖塑性区那种形状的微裂区。③虚拟裂纹模型<sup>[19]</sup>。该模型假定混凝土裂纹端部材料服从软化应力-位移关系。④过程区模型<sup>[20]</sup>。该模型将真实裂纹长度用有效裂纹长度取代,有效裂纹尖端应力仍由线弹性断裂力学计算。但在有效裂纹的过程区上作用有闭合压应力,如果过程区是窄条带状结构,则闭合应力分布就可以从单轴应力-位移曲线中得到。⑤钝化裂纹带模型<sup>[21]</sup>。该模型假定混凝土裂纹前部为一带状的正交各向异性弹性材料。近年来,还涌现出不少在上述模型基础上的改进型<sup>[22,23]</sup>。虽然这些模型各异,但总的思想都是将裂纹端部的一定区域视为各向异性的非线性软化地带,以便能够考虑微裂纹、骨料等因素对宏观裂纹的屏蔽作用。在小尺寸试件断裂破坏分析时,各种模型的结果比较接近。但对大体积试件,其结果则比较分散<sup>[24]</sup>。对这些模型的评估,还有待进一步的研究。

最早将损伤力学概念用于混凝土材料研究的是 Dougill<sup>[25]</sup>。损伤力学不同于断裂力学,后者将裂纹作为边界条件来处理,关心的是裂纹顶端的力学性质,在远离裂纹的广大区域内仍假定为均匀连续体。而前者将裂纹作为材料内部的状态参量来处理,关心的是整体的力学性质,它能够更真实地反映材料的内部结构,更准确地计算材料的各种宏观力学性能。最重要的是,它能够根据载荷及环境的作用,预测材料内部结构的变化,从而预测材料破坏的全过程。Mazars<sup>[26]</sup>和 Loland<sup>[27]</sup>根据混凝土应力-应变曲线的非线性关系及软化特点,分别提出了简单拉伸的损伤力学指数模型。为了使损伤分析推广到单轴压缩情况, Benquiche<sup>[28]</sup>提出了各向异性的3维损伤力学公式,并保持了与单轴拉伸公式一致的形式。此外,在连续介质不可逆热力学框架内,还发展了各向同性的混凝土连续损伤模型<sup>[29,30]</sup>,诱发各向异性损伤模型<sup>[31]</sup>以及高压载荷损伤模型<sup>[32]</sup>。后两个模型反映了载荷作用下混凝土损伤的各向异性效应。

近年来,损伤力学已经开始用在混凝土的强度计算和设计中,但作为一门学科尚不够系统和完善。例如,如何选择合理的损伤变量,并把导出的公式简化到适用于工程计算的水平;如何有效地进行损伤实测,以便判定混凝土的初始损伤状态,以及观察不同应力条件下,损伤演化的条件和规律;还有损伤破坏判据,动态和蠕变情况下的损伤力学模型等都有待进行深入的研究。

混凝土是一种对其自身缺陷尤为敏感的脆性材料。混凝土的非弹性响应、本构模型及微观结构对宏观力学性能的影响研究,已成为工程力学领域里一个重要的部分。混凝土力学研究主要关心的问题有:①非弹性体积变化、压实、干燥收缩、结冰膨胀和湿胀变形。②由于裂纹和滑移存在所引起的依赖于压力的屈服和由于内摩擦引起的流动中可能的非正交性。③脆性应变软化。裂纹也可能引起弹性非线性,而卸载行为通常是弹性的。④非线性蠕变。混凝土蠕变是裂纹、短时蠕变和长时蠕变联合贡献的结果,在正常工作应力下,裂纹通过摩

擦传递载荷,使蠕变增加,当应力大于抗裂强度时,又由于增加裂纹数目和长度使蠕变进一步增加。短时蠕变是应力诱导硬化水泥浆结构的毛细管水的重新分布造成的。长时蠕变则是凝胶粒子活化运动的结果。

此外,如何将混凝土细观损伤机理与宏观特性结合起来,把强度和断裂理论建立在微裂纹演化的细观动力学基础上,统一导出所有重要的力学量,并以某些更基本的物理量表示,如何建立更适于体现混凝土应力应变关系的本构方程,这些都是实现混凝土强度和韧度设计、稳定性分析所必须解决的课题。

### 3 混凝土破坏理论当前研究的主要问题

3.1 界面破坏问题 骨料和砂浆结合面的性质是研究混凝土破坏的基础,结合缝的演化和变形局部行为的控制是决定混凝土强度和变形性能的主要因素。因此,界面研究可以作为高强度混凝土设计的一种手段<sup>[38]</sup>。界面问题分界面损伤和界面断裂二类。前者研究界面微裂纹分布及扩展性质,包括有均匀及非均匀模型<sup>[34,36]</sup>。后者研究界面裂纹的断裂力学性质。界面裂纹突出的特点是本质上非对称的混合型断裂,例如骨料和砂浆的结合带常处在拉剪或压剪状态。有关界面裂纹的研究主要集中在界面断裂韧度上<sup>[36,37]</sup>。例如研究表明,界面断裂韧度是相位角 $\psi = \text{tg}^{-1}(K_{II}/K_I)$ 的函数,随着 $K_{II}/K_I$ 比值的增大,断裂韧度可以成倍地增大<sup>[38]</sup>。此外,还有有关界面裂纹能量释放率<sup>[39]</sup>、界面裂纹尖端奇异场及其振荡性<sup>[40,41]</sup>、界面脱粘性质<sup>[42]</sup>和界面裂纹扩展路径<sup>[43]</sup>等的不少研究。同时还提出了一些界面断裂力学模型<sup>[44,45]</sup>,也有用位错群的方法处理界面裂纹问题的研究<sup>[46]</sup>。

3.2 细观结构破坏问题 混凝土力学非线性及破坏性质,主要取决于细观结构的变化。这个层次的分析克服了宏观力学方法一些模糊不清的概念。例如, Bazant<sup>[47]</sup>通过类似于多晶体材料中塑性的研究,得到了切线刚度及增量形式的混凝土本构方程, Ortiz<sup>[48]</sup>从复合材料角度出发,提出了混凝土的塑性流动规律,并对卸载情况下骨料与基体的耦合行为进行了分析。Nobile<sup>[49]</sup>在几个假定基础上,导出了依赖于材料微结构的应变表达式。[50,51]在不连续微结构模型基础上发展了应变软化方程。此外,骨料的剪切传递作用,混凝土的剪切滑移也有不少相应的模型出现<sup>[52,53]</sup>。细观结构对混凝土裂纹扩展也有明显影响,例如 Kunin<sup>[54]</sup>分析了骨料对开裂的阻止作用。Zaitsev 和 Wittmann<sup>[55]</sup>分析了骨料对裂纹扩展路径的影响,还有人从复合材料角度对混凝土断裂韧度进行了研究<sup>[56]</sup>。

3.3 损伤断裂耦合破坏问题 混凝土宏观裂纹尖端附近存在着众多的微裂纹,这些微裂纹主要是界面结合缝,并起着软化材料的作用。近年来,与金属材料的弹塑性断裂理论相似,也出现了非均质脆性材料的损伤断裂理论。该理论力图将适合于混凝土非线性描述的损伤本构关系与断裂力学参量结合起来,并在此基础上研究混凝土裂纹尖端应力场性质和损伤断裂判据。但是由于本构关系的复杂性,除了一些简单的分析外<sup>[57,58]</sup>,这一理论的研究进展不大。其他的研究则重点放在裂尖微裂纹的屏蔽效应上,例如, Ortiz<sup>[59]</sup>运用 $J$ 积分方法,得到了脆性材料有效韧度 $K_{IC}^{eff}$ 值。它由两项构成,第1项表示由于微裂纹的存在引起的裂尖应力的衰减,第2项则表示由于微裂纹的存在而导致的材料性能的劣化。因此,微裂纹是起韧化作用还是脆化作用取决于这两项的结果。Kachanov<sup>[60]</sup>从裂尖微裂纹分布的几何形态,研究了微裂纹对宏观裂纹的屏蔽作用。计算结果表明,这种屏蔽作用与微裂纹排向有关。混凝土宏观裂纹分叉现象十分明显, Smith<sup>[61]</sup>研究证明,分叉将使断裂韧度值增大。

3.4 本构关系问题 混凝土本构关系的研究,一方面是结构非线性分析的需要,另一方面也是断裂非线性分析的需要。长期以来,它一直是人们重点研究的问题。尽管混凝土材料不是弹性的,仍有学者通过使用依赖于剪应力的体积模量,建立起全应力-全应变关系,并通过引入一个附加项,计及由于内部损伤和膨胀在给定应变下产生的体积应力降低<sup>[62]</sup>。也有人提出混凝土次弹性增量本构方程<sup>[63]</sup>。但是这类方法都不能区别加载和卸载过程。Han和Chen<sup>[64]</sup>建立了混凝土的塑性模型,他们假设混凝土屈服面的母线由两段抛物线组成,其横截面为圆形,并服从等向强化规律与关联流动法则,由此建立了应力-应变关系。Bazant<sup>[65]</sup>根据内蕴塑性理论,发展了适于描述混凝土非线性的内蕴塑性本构方程。近年来,人们把断裂机理引入混凝土本构方程的研究中。例如,William等<sup>[66]</sup>在复合材料断裂模型基础上,发展了一种应变软化的塑性本构模型。Chen和Suzaki<sup>[67]</sup>建立了增量型的断裂混凝土本构方程。Onate等<sup>[68]</sup>也在增量塑性理论基础上建立了开裂混凝土的本构方程。此外,Bazant等<sup>[69]</sup>还提出了一种广义的流变模型,它可以描述应变软化、弹性变形、蠕变变形、收缩和热变形下的混凝土行为。

3.5 损伤力学问题 混凝土损伤力学问题实质上仍是确定本构关系的问题,需要突出指出的是,可以通过一些物理关系及实验结果,得到损伤变量演化的动力方程。Frantziskonis和Desai<sup>[70]</sup>通过假定微裂纹形成的应力降低区,提出了弹塑性增量本构方程和指数损伤演化方程。Sidoroff<sup>[71]</sup>利用连续介质力学方法得到了本构方程,并在假定耗散势存在的条件下,由正交法则得到损伤演化方程。Kračunovic<sup>[72]</sup>发展了更完善的连续损伤理论,用类似于塑性屈服面的概念,定义了损伤面,并由此建立了损伤定律。此外,Lubliner<sup>[73]</sup>和Yazdani<sup>[74]</sup>还分别发展了塑性损伤耦合作用的混凝土本构模型。

3.6 动态破坏问题 混凝土结构动态破坏问题十分突出,其中有冲击破坏、疲劳破坏及加速度率影响等。研究表明<sup>[75,76]</sup>,当加载速率增大时,混凝土应力-应变曲线的线性程度提高,而且弹性模量增大。在典型情况下,当应变速率增大6个数量级时,混凝土抗压强度大约增大1倍。为此,Suaris等<sup>[77]</sup>从理论上建立了能够反映应变率效应的损伤力学模型。Shah和John<sup>[78]</sup>还对应变速率对混凝土断裂韧度的影响进行了研究。混凝土疲劳破坏主要集中在疲劳损伤的研究上,Pous和Maso<sup>[79]</sup>研究了低周疲劳载荷下混凝土的微结构变化。Wu<sup>[80]</sup>和Suaris<sup>[81]</sup>分别建立了混凝土疲劳损伤力学模型。Marigo<sup>[82]</sup>给出了脆性疲劳损伤的统一描述方程。此外,Yankelevsky<sup>[83]</sup>根据循环实验观察的结果,提出了“焦点”模型。由冲击及地震载荷引起的惯性效应破坏,随着结构工程抗震设计的需要而变得日益重要。Park<sup>[84]</sup>对混凝土在地震载荷作用下的损伤破坏建立了分析模型。Evans<sup>[85]</sup>使用热激活裂纹扩展模型预测了混凝土材料断裂的率敏感性。Lin等<sup>[86]</sup>还对冲击载荷作用下混凝土开裂作了非线性分析。Bui和Ehrlacher<sup>[87]</sup>也建立了动态的损伤断裂模型。此外,Maue<sup>[88]</sup>对入射弹性波和单位阶跃函数冲击载荷作用下的裂尖渐近场进行了分析。有关弹性波对界面裂纹扩展的影响以及裂纹体的弹性动力学也有不少研究<sup>[89,90]</sup>。需要指出的是,混凝土在高速冲击载荷作用下,其物理、化学性质发生显著变化,因而本构方程异常复杂。虽然高速率加载下的本构关系有了一些工作,但断裂力学尚未同这一领域联系起来。

3.7 蠕变破坏问题 混凝土蠕变效应十分显著。蠕变与材料损伤断裂之间关系十分紧密,并且受到温度和湿度等外部环境的强烈影响。研究表明<sup>[91,92]</sup>,在持续载荷作用下混

土结构随着相对湿度的增大,破坏时间减短;随着温度的增高,破坏时间增长。也就是说,水分加速裂纹的扩展,温升则减缓裂纹的扩展。Zaitsev 和 Scerbakov<sup>[93]</sup>建立混凝土蠕变损伤断裂模型,并给出了蠕变断裂判据。Beaudoin<sup>[94]</sup>研究了水分扩散和化学腐蚀对混凝土开裂的影响。Ehm等<sup>[95]</sup>和Evans等<sup>[96]</sup>分别对混凝土高温蠕变断裂机理进行了分析,Bui等<sup>[97]</sup>用局部方法对蠕变条件下裂纹的扩展进行了研究。Chraznowski<sup>[98]</sup>从界面细观分析出发,建立了蠕变损伤断裂模型,并对裂纹稳态扩展速率进行了预测。Weitsman<sup>[99]</sup>考虑温度、湿度及损伤的影响,利用连续介质热力学分析,建立了粘性损伤力学方程。De Borst等<sup>[100]</sup>还提出一个数值模型,它既可以考虑混凝土的众多微裂纹,又可以计及微裂纹间材料的粘弹性。此外,有关混凝土蠕变本构方程也有不少的研究<sup>[101,102]</sup>。值得一提的是,Bazant<sup>[103]</sup>和Jonasson<sup>[104]</sup>分别提出的混凝土线性和非线性干燥模型,也有助于对混凝土收缩裂纹的认识。

3.8 复合型裂纹及断裂判据 混凝土Ⅱ型裂纹及复合型裂纹的研究远没有像Ⅰ型裂纹那样清楚,甚至对混凝土中Ⅱ型裂纹扩展是否存在还有争议,这是因为如果裂纹总是沿尖端前方最大拉应力垂直方向扩展,则总是Ⅰ型裂纹。Izumi等<sup>[105]</sup>设计了一种纯剪实验,证实了混凝土中Ⅱ型裂纹扩展是存在的,并且发现,Ⅱ型断裂韧度值比Ⅰ型受非均质的影响更大。近年来,混凝土断裂力学研究逐步向复合型裂纹的方向发展<sup>[106,107]</sup>,也有人开始用分离模型的有限元法和虚拟裂纹模型计算复合型裂纹开裂<sup>[108,109]</sup>。对混凝土断裂判据的研究也出现了一些新的概念,例如,徐世烺等<sup>[110]</sup>提出了双 $K$ 断裂准则,分别可以确定稳定裂纹扩展和非稳定裂纹扩展阶段。Jeng 和 Shah<sup>[111]</sup>提出了双参量断裂准则,即用临界应力强度因子和临界裂尖张开位移共同决定裂纹的扩展。此外,针对Ⅰ,Ⅱ复合型裂纹,有学者提出了椭圆断裂判据<sup>[112]</sup>和最大拉应变准则<sup>[113]</sup>。

3.9 计算方法及数值模拟 混凝土裂纹扩展有明显的亚临界过程,因此裂纹扩展的数值模拟及计算方法的研究就显得十分重要。早期,为了将有限元法用于计算混凝土开裂,Rashid<sup>[114]</sup>提出疵弥裂纹区模型,以后经De Borst<sup>[115]</sup>进一步改进。在该模型中,裂纹并不完全分离,在结点处由若干平行纤维束连接,材料由此变成各向异性体。与此不同,Ngo 和 Scerdelis<sup>[116]</sup>则提出分离裂纹模型,裂纹两边有限单元相互分离。Bazant<sup>[21]</sup>把分离裂纹尖部“疵弥”化,发展出钝化裂纹带模型。计算中将各向同性弹性模量矩阵改变成正交各向异性的弹性模量矩阵。Carpinteri<sup>[117]</sup>还发展了有粘聚压应力作用裂纹的有限元方程。此外,Blandford<sup>[118]</sup>发展了边界元法,用来计算准静态和疲劳裂纹扩展。Gerstle<sup>[119]</sup>和Zubelewicz等<sup>[120]</sup>提出界面元方法来计算非线性的裂纹扩展。Roelfstra 和 Sadouki<sup>[121]</sup>借助 SMANC (Software Modules to Analyses Numerical Concrete) 方法,对混凝土复合结构进行了计算机模拟,并建立了界面层有限单元模型。迄今为止,发展较为成熟的数值模拟模型有结构单元模型<sup>[122]</sup>,复合材料结构模型<sup>[123]</sup>以及统计结构模型<sup>[124]</sup>。

3.10 实验技术 混凝土破坏本质上是细观结构的系列变化过程。有关混凝土裂尖性质、损伤演化等的探测和成像手段,近年来有了很大的发展,所采用技术包括声学、光学和射线技术等。声学技术有超声波速检测法<sup>[125]</sup>,它是将超声波在材料中的传播速度与各种载荷水平下的损伤相联系。声发射法<sup>[126]</sup>则是将声发射事件的信号与各种载荷水平下的损伤相联系。此外,还有声吸收频谱分析法<sup>[127]</sup>等。光学技术有光学显微镜观察<sup>[128]</sup>和扫描电子显微镜(SEM)<sup>[129]</sup>观察。后一种方法可以跟踪裂纹的动态过程。此外,散斑照相<sup>[130]</sup>、

干涉法<sup>[181]</sup>以及全息干涉<sup>[182,183]</sup>等散射相干光干涉法,也已广泛应用于混凝土破坏研究上。射线技术应用最多的是X射线照相<sup>[184]</sup>。红外显示技术和CT技术也有报道。Luong<sup>[185]</sup>还利用红外振动热记录仪,观察了混凝土起裂及裂纹成核过程。

有关混凝土破坏理论当前研究的主要问题除了以上讨论的几个方面外,也有不少人另辟蹊径,提出了一些新的理论方法。袁龙蔚<sup>[186]</sup>研究了损伤演化与裂纹扩展过程中的流变与耗散现象,把流变力学与损伤和断裂力学结合起来,建立了一个新的破坏理论——缺陷体流变学理论,它把物体中连续的流变和不连续的缺陷在热力学过程相容的原则下结合起来,研究复杂条件下材料中裂纹的发生和发展规律。Wittmann和Zaitsev<sup>[187]</sup>发展了随机断裂统计理论,根据混凝土裂纹分布的随机特性提出了3个简单假设,并在此基础上求出混凝土结构发生断裂的概率。他们还采用 Monte Carlo 方法成功地模拟了混凝土中随机裂纹的增长。此外,分形几何法也开始应用在混凝土裂纹分叉特征的研究上,较好地模拟了裂纹分叉的非规则性,并将分形效应对断裂韧度的影响由一个简单的关系给出<sup>[188]</sup>。

#### 4 混凝土破坏理论研究的展望

混凝土破坏理论一个可能的发展方向是结合自身特点,吸取现代力学理论,如非线性连续统力学及非平衡态热力学的研究成果,结合宏观、细观与微观断裂理论,充分考虑混凝土结构的尺寸效应、时间效应及各种物理化学效应,发展新的交叉学科分支。在这个总体思想下,需要做的具体工作有如下几个方面:①微变形研究。混凝土变形的非线性和时间效应在很大程度上由作为连续相的硬化水泥浆导致。硬化水泥浆在微观上是一种含水的多孔材料,如果能够从微观角度,用包含若干凝胶粒子的单元模型,在扩散热力学基础上定量建立变形动力学方程,则对于了解混凝土的变形特征将具有本质上的意义。②复合材料断裂研究。混凝土宏观裂纹的亚临界扩展、裂纹分叉、界面裂纹的产生及扩展和砂浆非稳定裂纹的止裂等,都由混凝土非均质的复合结构所导致。因此,有必要对骨料与砂浆,砂与硬化水泥浆界面断裂韧度进行深入的研究,并建立界面裂纹扩展及分叉判据。必须从细观力学角度对二相硬质粒子对基体裂纹扩展的钉扎效应从理论上予以研究。③发展混凝土化学损伤力学和有扩散的损伤力学,以处理混凝土结构由于水化放热、干燥收缩和化学腐蚀等造成的分布裂纹问题。④建立尺寸效应的胞模型。在非线性连续统力学和非平衡态热力学理论基础,发展能够计及各类微观和细观效应的统一形式的混凝土本构方程,并将其简化到能够实现工程计算的水平。⑤发展混凝土断裂的数值模拟技术,以实现混凝土复合结构、微裂纹扩展路径与形态、裂纹聚合过程的计算机模拟,预测混凝土损伤断裂破坏的全过程。⑥进一步深入和完善混凝土在动态高速加载条件下,以及低周反复加载条件下裂纹扩展的研究。尤其是复合型裂纹尖端的力学性质,从理论上和实验上都要弄清。对持久载荷作用下混凝土的蠕变断裂机理应建立起相应的理论和计算模型。

#### 参 考 文 献

- 1 郭少华,混凝土损伤与断裂力学,西安冶金建筑学院研究生教材(1991):9
- 2 Slate F O, Olsefski S, *ACI J.*, 60 (1963) 575
- 3 Jones R, *British J. Appl. Phys.*, 3 (1952): 229
- 4 Kaplan M F, *ACI J.*, 58 (1961): 590
- 5 Carpinteri A, *ICF-5, Cannes*, 4 (1981): 1491
- 6 Sok C, et al, *Cem. Concr. Res.*, 4 (1974): 641

- 7 Naus D J, Lott J L. *ACI J.*, 66 (1969) : 481
- 8 Glucklich J. Proc. Int. Conf. on Mech. Behaviour of Mater., Kyoto (1972) : 104
- 9 Hillemeier B, Hilsdorf H K. *Cem. Concr. Res.*, 7 (1977) : 523
- 10 Welsh P F. *Mag. Concr. Res.*, 28 (1976) : 37
- 11 Okada K, et al. Proc. Int. Conf. on Mech. Behaviour of Mater., Kyoto (1972) : 72
- 12 Glucklich J. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, 109 (1983) : 127
- 13 Carpinteri A. *Materiaux et Constructions*, 14 (1981) : 151
- 14 Modeer M. Report TVBM-1001, Div. of Building Mater., Univ. of Lund, Sweden (1979)
- 15 Carpinteri A, Ingraffea A R. *Fracture Mechanics of Concrete: Material Characterization and Testing*. Martinus Nijhoff Publishers, The Hague (1984) : 138
- 16 Shah S P, McGarry F T. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, 97 (1971) : 1663
- 17 Lenian J C, Bunsell A R. *J. Mat. Sci.*, 14 (1979) : 321
- 18 于晓中等. 水利学报, 9 (1983) : 20
- 19 Hilleborg A, et al. *Cem. Concr. Res.*, 6 (1976) : 773
- 20 Wecharatan M, Shan S P. *Fracture Mechanics of Concrete*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam (1983) : 463
- 21 Bazant Z P, Cedolin L. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, 105 (1979) : 297
- 22 Liaw B M, et al. *ibid.*, 116 (1990) : 429
- 23 De Borst R, Naute P. *Engng. Comput.*, 2 (1985) : 35
- 24 Bazant Z P, Pfeiffer P A. Proposal for RILEM Recommendation (1987)
- 25 Dougill J W, et al. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, 102 (1976) : 333
- 26 Mazars J. ICF-5, Cannes, 4 (1981) : 1503
- 27 Loland K E. *Cem. Concr. Res.*, 10 (1980) : 395
- 28 Benouniche S. These 3eme Cycle, Univ. Paris, 6 (1979)
- 29 Mazars J. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, 115 (1989) : 345
- 30 Ladeveze P. Proc. 5eme J. Nat. des Composite, Paris (1986) : 667
- 31 Collombet F, Begues J. Proc. Int. Conf. on Concrete under Multiaxial Conditions, Toulouse, 1 (1984) : 93
- 32 Pijaudier-Cabot G. These 3eme Cycle, L. M. T., Univ. Paris (1979)
- 33 Bazant Z P. *Appl. Mech. Rev.*, 39 (1988) : 675
- 34 Needleman A. *J. Appl. Mech.*, 54 (1987) : 525
- 35 Needleman A. *J. Mech. Phys. Solids*, 38 (1990) : 289
- 36 Taylor M A, Brous B B. *ACI J.*, 61 (1964) : 937
- 37 Lee J C, et al. *Engng. Fract. Mech.*, 27 (1987) : 27
- 38 Cao H C, Evans A G. *Mech. of Mater.*, 7 (1989) : 295
- 39 Mulville D R, et al. *Engng. Fract. Mech.*, 8 (1976) : 555
- 40 Ting T C T. *Int. J. Solids Structures*, 22 (1986) : 965
- 41 Suo Z. *Proc. Roy. Soc., Lond.*, A427 (1990) : 331
- 42 Toya M. *Int. J. Fract.*, 11 (1975) : 989
- 43 Shen C F, et al. *J. Appl. Mech.*, 48 (1981) : 313
- 44 Deale F, Erdogan F. *ibid.*, 55 (1988) : 317
- 45 Comninou M. *ibid.*, 44 (1977) : 631
- 46 Willis J R. *J. Mech. Phys. Solids*, 19 (1971) : 353
- 47 Bazant Z P. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, 114 (1988) : 1672
- 48 Ortiz M. *Mech. of Mater.*, 4 (1987) : 157
- 49 Nobile L. Proc. Int. Conf. on Fract. Mech. of Concrete, Lausanne, 18 (1985) : 75
- 50 Faribara B J, William C S. Civil Engng. Studies, Structural Research Series [No. 531, Univ. of Illinois (1986)
- 51 徐道远. 水利学报, 9 (1989) : 18
- 52 Walraven J C. Doctoral thesis, Delft Univ. of Technology (1980)
- 53 Pauley T, Loeber P S. *ACI SP42*, 1 (1974) : 1
- 54 Kunin I, Gommerstadt B. ICF-6, New Delhi, 1 (1984) : 495
- 55 Zaitsev Y U, Wittmann F H. ICF-4, Waterloo, 3 (1977) : 1197
- 56 Rao C V S K. *Engng. Fract. Mech.*, 18 (1983) : 35
- 57 Li V C. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, 112 (1986) : 566
- 58 Ortiz M. *J. Appl. Mech.*, 54 (1987) : 54



- 59 —. *Int. J. Solids Structures*, **24** (1988) : 231
- 60 Kachanov M. *Engng. Fract. Mech.*, **25** (1986) : 625
- 61 Smith E. *Arch. Mech.*, **38** (1986) : 185
- 62 Cedolin L. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, **103** (1977) : 423
- 63 Elwi A A, Murray D W. *ibid*, **105** (1979) : 623
- 64 Han D J, Chen W F. *Int. J. Solids Structures*, **22** (1986) : 935
- 65 Bazant Z P, Bhat P. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, **102** (1976) : 701
- 66 William K, et al. Proc. Int. Conf. on Fract. Mech. of Concrete, Lausanne, **18** (1985) : 149
- 67 Chen W F, Suzuki H. *Comput. Struct.*, **12** (1980) : 23
- 68 Onate E, et al. Computational Plasticity (eds Owen D R J, et al), Pineridge Press, Swansea (1987) : 1351
- 69 Bazant Z P, Chem J C. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, **111** (1985) : 391
- 70 Frantziskonis G, Desai C S. *Int. J. Solids Structures*, **23** (1987) : 733
- 71 Sidoroff F. *Euromech.*, **17** (1981) : 147
- 72 Krajinovic D, Fronseka G V. *J. Appl. Mech.*, **48** (1981) : 309
- 73 Lubliner J. *Int. J. Solids Structures*, **25** (1989) : 299
- 74 Yazdani S, et al. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, **116** (1990) : 1435
- 75 Rusch H. *ACI J.*, **57** (1960) : 1
- 76 Mindess S, et al. *Am. Cer. Soc. Bull.*, **56** (1977) : 429
- 77 Suaris W, Shah S P. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, **110** (1984) : 985
- 78 Shah S P, John R. Proc. Int. Conf. on Fract. Mech. of Concrete, Lausanne, **18** (1985) : 453
- 79 Pous G, Maso J C. ICF-6, New Delhi, **4** (1984) : 2801
- 80 Wu C H. Proc. Int. Conf. on Fract. Mech. of Concrete, Lausanne, **18** (1985) : 81
- 81 Suaris W. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, **116** (1990) : 1020
- 82 Marigo J. *J. Engng. Fract. Mech.*, **21** (1985) : 361
- 83 Yankelevsky D Z, et al. Fracture Mechanics of Concrete Structure (ed Eiffigen I), Elsevier Science Publishers, Amsterdam (1987) : 181
- 84 Park Y J. *J. Struct. Engng. Div., ASCE*, **111** (1985) : 722
- 85 Evans A G. *Int. J. Fracture*, **10** (1974) : 251
- 86 Lin J H, Qian J C. Proc. Int. Conf. on Fract. Mech. of Concrete, Lausanne, **18** (1985) : 355
- 87 Bui H O, Ehrlicher A. ICF-5, Cannes, **1** (1983) : 86
- 88 Maue A W. *Zeitschrift für Angewandte Math und Mech.*, **34** (1954) : 1
- 89 Srivastava K N, et al. *Int. J. Fracture*, **14** (1978) : 145
- 90 Sih G C. *Int. J. Fracture*, **13** (1977) : 119
- 91 Mindess S, et al. *Cem. Concr. Res.*, **4** (1974) : 953
- 92 Barrick J E, et al. *J. Test Eval.*, **4** (1976) : 61
- 93 Zaitsev Y U, Scerbakov E N. ICF-4, Waterloo, **3** (1977) : 1219
- 94 Beaudoin J J. *Cem. Concr. Res.*, **15** (1985) : 871
- 95 Ehm C, et al. ICF-6, New Delhi, **5** (1984) : 2795
- 96 Evans A G, et al. Proc. 2nd Int. Conf. on Creep and Fracture of Engng., Mater. and Struct., Swansea, **2** (1984) : 451
- 97 Bui H D, et al. *ibid*, **2** (1984) : 937
- 98 Chraznowski M. *J. Mecanique Appliquee*, **3** (1982) : 22
- 99 Weitsman Y. *J. Appl. Mech.*, **55** (1988) : 773
- 100 De Borst R, et al. 4th RILEM Int. Symp. on Creep and Shrinkage of Concrete, Paris (1986) : 312
- 101 Hope B B, Brow N H. *Cem. Concr. Res.*, **15** (1975) : 577
- 102 Acker A, et al. ACI-Symp. on Properties of Concrete of Early Ages, Chicago (1985) : 33
- 103 Bazant Z P, Raftshol W J. *Cem. Concr. Res.*, **12** (1982) : 1239
- 104 Jonasson J E. 8th SMIRT, Brussel, **8** (1985) : 207b
- 105 Izumi M, et al. Proc. Int. Conf. on Fract. Mech. of Concrete, Lausanne, **18** (1985) : 347
- 106 Hillerborg A. ICF-7, Houston, **3** (1989) : 2259
- 107 Rots J G, De Borst R. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, **113** (1987) : 1739
- 108 Carpinteri A. *ibid*, **115** (1989) : 2344
- 109 Hassenzadeh M, Hillerborg A. Test Methods for Concrete and Rock (eds Mihzshi II, et al), Balkema, Rotterdam (1989) : 565
- 110 徐世雄, 赵国藩. 混凝土断裂力学研究. 大连理工大学出版社 (1991) : 123

- 111 Jeng Y S, Shah S P. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, **111** (1985) : 1227
- 112 于晓中. 水利学报, **6** (1982) : 27
- 113 徐道远. 水利学报, **6** (1982) : 57
- 114 Rashid Y R. *Nuclear Engng. Design*, **7** (1968) : 334
- 115 De Borst R. *Comp. Math. Appl. Mech. Engng.*, **62** (1987) : 89
- 116 Ngo D, Scerdelis A C. *J. Am. Concr. Inst.*, **64** (1967) : 152
- 117 Carpinteri A. ICF-6, New Delhi, **6** (1984) : 2801
- 118 Blandford G E, et al. Dep. of Struct. Engng Report 81-3, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell Univ. Ithaca (1981)
- 119 Gerstle W, et al. Proc. Int. Conf. on Bond in Concrete, Paisley (1982) : 97
- 120 Zubelewicz A, Bazant Z P. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, **113** (1987) : 1619
- 121 Roelfstra P E, Sadouki H. Proc. Int. Conf. on Fract. Mech. of Concrete, Lausanne, **18** (1985): 105
- 122 Shah S P, Winter G. *ACI J.*, **58** (1968) : 591
- 123 Buyukozturk O, et al. *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, **96** (1972) : 581
- 124 Wittmann F H, et al. *Mater. Struct.*, **14** (1981) : 83
- 125 Whitehurst E A. Monograph No. 2 ACI, Detroit (1966)
- 126 Terrien A, Bergues F. ICF-5, Cannes, **3** (1981) : 1708
- 127 L'Hermite R. *The Failure of Concrete*, RILEM Bulletin, **18** (1954) : 27
- 128 Dhir R H, Sangha M. *Materiaux et Constructions*, **37** (1974) : 17
- 129 Mindess S, Diamond S. *Cem. Concr. Res.*, **10** (1980) : 509
- 130 De Backer L C. *Nondestructive Test*, **8** (1975) : 177
- 131 Barker D B, Fourny M E. *Experimental Mechanics*, **17** (1977) : 241
- 132 Maji A K, Shah S P. ACI-SP112, Nondestructive Test (1989) : 83
- 133 Stroeve P, et al. Proc. RILEM Symp. New Developments in Nondestructive Testing on Non-Metallic Materials, Constantza (1974) : 19
- 134 Tasuji M E, Slate F O. *ACI J.*, **75** (1978) : 506
- 135 Luong M P. Proc. Int. Conf. on Fract. Mech. of Concrete, Lausanne, **18** (1985) : 249
- 136 袁龙蔚. 力学进展, **19** (1989) : 20
- 137 Wittmann F H, Zaitsev J W. *Advances in Research on the Strength and Fracture of Materials* (éd Taplin D M R), **3** (1977) : 983
- 138 谢和平. 力学学报, **21** (1989) : 613

## THE RESEARCH PROGRESS IN FAILURE THEORY OF CONCRETE

Guo Shao-hua

Xi'an Institute of Metallurgy and Construction Engineering

**Abstract** A brief analysis of material properties, failure characteristics and mechanism of concrete and a survey of the applications of damage mechanics and fracture mechanics in studies on concrete are presented here. Emphasis is placed on the new advances in the main research issues of concrete failure. The future research trends and opportunities in this field are outlined in the final part of the paper.

**Keywords** concrete failure; interface crack; mesomechanics; constitutive equation; damage; fracture