

# 混凝土损伤研究综述<sup>①</sup>

封伯昊<sup>1</sup>, 张立翔<sup>1</sup>, 李桂青<sup>2</sup>

(1. 电力工程学院, 昆明理工大学, 云南昆明 650051; 2. 武汉理工大学, 湖北武汉 430029)

**摘要** 系统地综述了混凝土损伤研究的概况, 并对有待进一步研究的问题进行了讨论. 内容包括: 混凝土材料的损伤机理; 混凝土的静、动力损伤研究; 徐变损伤; 混凝土及结构的高、低周疲劳累积损伤; 混凝土概率累积损伤等.

**关键词:** 混凝土; 损伤; 本构模型; 累积损伤

**中图分类号:** TU 528. 1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007- 855X(2001) 03- 021- 10

## 0 前 言

混凝土作为一种重要的工程材料, 其应用和研究虽然已有了 100 多年的历史, 但是, 随着科学技术的发展, 人们对混凝土的结构形式、工作环境和使用寿命等的要求都有了巨大的变化. 随着结构形式由单纯的一般房屋建筑结构扩展到重力式海洋平台、高拱坝、核电站混凝土保护层和大跨度混凝土桥梁等复杂结构, 结构的工作环境和荷载作用也变得更加复杂, 导致许多新的工程和力学现象不断地出现, 使得对混凝土破坏理论的研究必须向更深的层次发展, 以适应工程实际的需要. 长期的研究和实践表明, 传统的混凝土强度理论, 如 Mohr- Coulomb 理论、剪应变能理论、极限拉应变理论及 Griffith 强度理论等, 在一定程度上已难以胜任现代结构, 人们开始将一些新的破坏理论应用于混凝土的破坏研究<sup>[1]</sup>.

自从 1961 年 Kaplan<sup>[2]</sup> 首次将断裂力学概念应用到混凝土材料中后, 其后的数十年间, 研究者们在这一领域开展了大量的工作, 取得了许多重要的成果. 但大量的研究同时也表明, 断裂力学在混凝土材料中的应用有其局限性. 这在现象上表现为断裂力学难以研究混凝土出现宏观裂纹之前的性态, 以及由于尺寸效应<sup>[3]</sup> 及骨料性质<sup>[4]</sup> 等因素的影响, 使得在试验室条件下, 难以得到代表混凝土断裂判据的力学指标- 断裂韧度  $K_{IC}$  值的稳定值等问题. 在原理上, 实际是混凝土材料内部的组构呈现很强的无序性, 导致其损伤和破坏的行为呈现强烈的统计涨落, 不考虑无序性效应的断裂力学难以反映损伤和破坏过程中的一些最重要的特征<sup>[5]</sup>.

作为断裂力学的必要发展和重要补充, 损伤力学是近二十年迅速发展起来的一门充满潜力的新学科. 1958 年 Kachanov<sup>[6]</sup> 首次提出用连续度的概念来描述材料的逐渐衰变, 使得材料中复杂的、离散的衰变过程可以用一个连续变量来描述, 成为损伤研究出现的里程碑. 其后, Robotnov<sup>[7]</sup> 于 1969 年引入了重要的损伤因子概念. 但作为一个理论体系, 损伤力学是从 70 年代才开始建立并得到逐步的发展. 期间, Leckie<sup>[8]</sup>、Hult<sup>[9]</sup>、Lemaitre<sup>[10]</sup>、Krajcinovic<sup>[11]</sup> 和 Sidoroff<sup>[12]</sup> 等学者的研究工作为损伤理论的形成和发展作出了重要贡献.

在外载和环境的作用下, 由于细观结构层次的微缺陷发展引起的材料或结构的劣化过程, 称为损伤. 损伤理论的重要研究方法之一, 是连续介质力学的唯象方法<sup>[13]</sup>. 它是连续介质力学和不可逆热力学为基础, 把物体内存在的微缺陷理解为连续的变量场(损伤场), 把损伤过程视为满足热力学定理的能量耗散过程, 用连续介质力学的唯象方法和概念研究微缺陷的发展及其对材料力学性质的影响. 它着重考察的是损伤对材料宏观力学性质的影响和材料及结构损伤演化的过程和规律. 这与传统破坏理论只注重由变形至破坏的起点- 终点式的研究截然不同, 损伤的研究方法将是使人们对材料的力学性质的认识更深刻和

① 收稿日期: 2001- 02- 12;

基金项目: 云南省自然科学基金资助项目(98E004Z);

第一作者简介: 封伯昊(1971~ ), 男, 博士研究生, 主要研究结构可靠度理论及其应用.

更趋于合理的重要途径。

混凝土与金属等均质材料有着截然不同的内在结构和力学性质,其最大的特点就是其组成是由硬化水泥浆和粗、细骨料等构成的多相复合结构<sup>[14]</sup>,这一特点决定了混凝土材料的非均质性和物理性态的复杂性.这种非均质的多相复合结构使得混凝土在承受外载之前,由于干缩、泌水等原因,已存在大量的微孔隙和界面裂缝,且这些缺陷的分布完全是随机的.当混凝土受到外界作用以后,弥散在材料内部的微裂缝开始逐渐长大,并随着荷载的变化,在部分区域出现贯通,直至形成宏观大裂缝.许多研究表明<sup>[15-17]</sup>,混凝土的破坏是结合缝的产生、成核、扩展、分叉、和失稳的过程.混凝土的破坏过程预示其本构行为将是非常复杂的,如果只单纯用经典弹性力学或塑性力学的处理方法来描述将难以获得理想结果.

基于对混凝土破坏机理和力学性质的深入研究,许多学者认为,损伤理论比较适合于混凝土的研究<sup>[13]</sup>.因为:(1)混凝土的损伤过程(开裂过程)可以看作是连续的,并且在很小的应力应变下就已发生;(2)裂缝的扩展方向几乎和最大主应力方向垂直;(3)外界作用以前存在的缺陷可以作为初始损伤处理.自从 Dougill<sup>[18]</sup>首次将损伤力学概念应用于混凝土的研究中后,大量的中外学者加入到了混凝土的损伤理论研究和实践应用中来,本文结合有待进一步研究的问题,对其中比较具有代表意义的研究进行了综述.

### 1 混凝土损伤本构模型研究

对材料力学行为的描述是通过本构关系来实现的,材料的本构行为包括变形、损伤和断裂三个方面.材料的变形引起损伤发展,损伤演化导致断裂,而材料的变形性能又与损伤演化相互耦合.对于混凝土材料,要想一次性的建立一个能适应各种加载条件和充分考虑各种内、外部作用的完善的损伤本构模型显然是很困难地.因此,人们在进行一定假设和近似的同时,遵循了单轴应力损伤→多轴应力损伤;从静力损伤→动力损伤;从弹性损伤→弹塑性损伤;从各向同性损伤→各向异性损伤的研究思路.通过理论和试验相结合的方法,逐步使理论与实际相符合.

#### 1.1 静力损伤研究<sup>[13, 19]</sup>

##### 1.1.1 Loland 损伤模型<sup>[20]</sup>

该模型为单轴拉伸模型.假设材料为弹性各向同性,损伤也是各向同性的,认为当应变小于峰值应力的应变  $\epsilon_f$  时,几乎在整个试件长度内都会产生微开裂;当应变大于  $\epsilon_f$  时,主要在破坏区内开裂.定义净弹性模量  $E_n$  为:

$$E_n = E / (1 - D_0) \tag{1}$$

$D_0$  为加载时刻混凝土的初始损伤,为一标量.根据有效应力和应变的关系,对应力应变曲线进行拟合得到损伤方程,式中  $C_1$ 、 $C_2$  和  $\beta$  为常数,可由边界条件确定:

$$D(\epsilon) = D_0 + C_1 \epsilon^\beta \quad 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_f \tag{2}$$

$$D(\epsilon) = D_f + C_2 (\epsilon - \epsilon_f) \quad \epsilon_f \leq \epsilon \leq \epsilon_u \tag{3}$$

该模型的优点在于模型简单,且在达到峰值应力前与试验结果大致相符.但由于假设峰值应力后的有效应力为常数,导致该段应力应变为线性关系,显然是一种近似描述.

##### 1.1.2 Mazars 损伤模型<sup>[21]</sup>

该模型认为在峰值应力前,应力应变关系为线性,材料无损伤;应力达到峰值后,即  $\epsilon > \epsilon_f$ , 随应变的增加,应力按指数函数衰减,此时的损伤本构方程为:

$$\sigma = \epsilon \cdot E(1 - D); \quad D = 1 - \frac{\epsilon_f(1 - A)}{\epsilon} - \frac{A}{\exp\{B(\epsilon - \epsilon_f)\}} \tag{4}$$

$A$ 、 $B$  为材料常数,由试验确定.这一模型可以通过等效应变  $\epsilon^m = (-\epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3)^{1/2}$  推广到三维情况.该模型对于单轴拉、压的情况与试验结果吻合较好,但在多轴应力情况下,误差较大.

其它还有一些类似的损伤模型,如分段线性损伤模型<sup>[22]</sup>、分段曲线损伤模型<sup>[23]</sup>等,基本思路与以上两种模型基本类似,认为在不同的应力应变阶段,损伤按一定的规律变化,然后通过试验数据的拟合,得出损伤演化方程.

### 1.1.3 Sidoroff 损伤模型<sup>[24]</sup>

Sidoroff 能量等价原理指出: 如果用有效应力张量代替柯西应力张量, 受损材料的弹性余能与无损材料的弹性余能在形式上相同。

基于此能量等价原理, 可以得到损伤量与弹性变形耦合的各向异性的脆弹性损伤方程为:

$$\varepsilon = \frac{1+Y}{E} \sigma \cdot (1-D)^{-2} - \frac{Y}{E} (1-D)^{-1} \text{tr}[\sigma \cdot (1-D)^{-1}] \quad (5)$$

该模型使用了损伤面的概念, 认为损伤是在损伤阈值面  $p(Y) = 0$  上发生的,  $Y$  为损伤能量释放率。

$$Y = \frac{1+Y_0}{E} \sigma^2 \cdot (1-D)^{-3} - \frac{Y_0}{E} \sigma \cdot (1-D)^2 \text{tr}[\sigma \cdot (1-D)^{-1}] \quad (6)$$

对于混凝土单轴拉伸情况, 设在峰值应力前损伤  $D = 0$ ,  $\varepsilon_0 = \sqrt{Y_0/E}$ ,  $Y_0$  为材料常数, 可取弹性应变极值  $\varepsilon_0$  时的  $Y_0$  再设  $D_2 = D_3 = 0$ , 可得损伤本构方程为:

$$\sigma = E(1-D)^2; D = 1 - (\varepsilon_0/\varepsilon)^2, \varepsilon > \varepsilon_0 \quad (7)$$

该模型有其可信的理论基础, 但应力峰值前的零损伤假设与实际情况不符. 由于在该模型中损伤阈值在  $Y$  空间是常量, 故又称为理想损伤模型, 类似于理想塑性的概念。

其它的混凝土各向异性损伤模型还有: Krajcinovic<sup>[25]</sup> 在准静态加载、小变形和等温条件下从 Helmholtz 自由能出发导出的损伤演变方程, 该模型认为随着损伤的发展, 混凝土的塑性变形往往很小, 故将其视为理想脆性材料, 并假设损伤演变的速度方向垂直于损伤面; 高路彬等基于 Gibbs 自由能等价原理导出的各向异性损伤模型<sup>[26]</sup>, 余天庆等提出的正交各向异性损伤模型<sup>[13]</sup>等。

研究表明, 混凝土在受到外界作用之前由于内部微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, 随着受到环境和外载的作用后, 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, 损伤的主方向与应力的主方向相同, 第一主损伤方向即为第一主应力方向. 并且, 损伤导致了材料的各向异性. 已有的各向同性损伤模型在复杂应力情况下均存在较大误差也在一定程度上说明了问题. 因此, 应该把发展既具有较强的预测能力, 并且又适于应用的各向异性模型作为重点研究方向之一. 从目前看, 基于能量分析建立的模型具有较大的潜力, 但距离真正解决问题还有相当的差距。

## 1.2 动态损伤研究

相对于静力破坏, 现代混凝土结构的动态破坏问题显得更加突出. 混凝土的动态损伤主要可以分为两类: 一类是结构承受周期性的重复荷载作用, 如地震荷载、风荷载、波浪荷载和车辆荷载等等, 这一类损伤通常归为结构的疲劳损伤的研究, 研究的重点主要是循环荷载作用下损伤的累积问题, 也是目前混凝土结构损伤研究的一个热点, 本文将在下面另外论述. 第二类是结构在承受加载速率较大的荷载(如冲击荷载的作用等)时的动力损伤研究, 研究的重点是在一次加载下材料的损伤演化问题, 这里所提动态主要指第二种. 不过, 由于疲劳损伤中很多荷载在一次循环内也具有加载速率较大的特点, 因此, 这两类动力损伤问题并非是完全独立的。

研究表明<sup>[27~29]</sup>, 混凝土在加载速率增大的情况下, 其物理、力学性质将发生变化. 当应变速率超过  $1/s$  量级时, 混凝土就将表现出与静力情况下不同的力学性质. 包括当加载速率增大时, 混凝土的应力-应变曲线的线性程度提高, 弹性模量也会增大等. 在典型情况下, 当应变速率增大 6 个量级时, 混凝土抗压强度提高大约 1 倍. 这些表明, 混凝土在动力作用下损伤与变形的耦合是不可忽略的, 即必须考虑损伤对应力应变场的影响. 而在静力情况下, 往往采用全解耦或半解耦的方法加以简化. 因此, 在动力荷载作用下混凝土的损伤本构方程将远较静力下的损伤模型复杂. 例如, 如果选择弹性模量作为反映在动力荷载下材料的劣化指标, 静力损伤模型得出的结果将与实际违背。

相对于疲劳累积损伤理论的研究, 第二类动力损伤的研究还开展得较少, 原因在于考虑动力效应后的损伤模型要复杂得多, 同时, 该类动力问题的损伤试验难度也较大. 目前, 无论是理论模型还是试验研究的报导在国内外都不多见. 不过, 一些学者还是进行了这方面的尝试. 其中有, Sauris<sup>[30]</sup> 建立的能够反映应变

率效应的损伤力学模型; Bui<sup>[31]</sup> 建立的动态损伤断裂模型; Brooks 等<sup>[32]</sup> 利用“高应力体积”概念, 通过拟合动力参数得到的动力损伤本构方程; 李庆斌等<sup>[33, 34]</sup> 基于双剪强度理论, 利用混凝土在快速变形和标准静速条件下应力-应变曲线类似的特点和已有的静力损伤模型, 进行一定假设, 推出单轴和复杂应力下的动力损伤本构方程. 可以说, 混凝土动力损伤的研究基本上还是处于起步阶段.

### 1.3 徐变损伤研究

混凝土徐变(有时也称蠕变)的研究一直是力学和材料学研究的重点之一, 许多学者作过各种有益的研究<sup>[35~37]</sup>, 但距离问题的最后解决还较远. 从细观角度看, 徐变是混凝土在持续载荷的作用下, 材料中微裂缝的数量和长度的增加、扩展, 从而导致材料劣化的过程, 而这正是损伤力学的研究对象, 因此, 损伤理论是研究混凝土徐变的一种有力工具.

简便起见, 假设混凝土是均质、弹性和各向同性的, 而徐变损伤也是各向同性的, 则损伤变量为一标量. 根据 Lemaitre 应变等效假设<sup>[38]</sup> 和线性徐变理论的叠加原理<sup>[39]</sup>, 可以得到压应力下的弹性徐变耦合损伤模型为<sup>[40]</sup>:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)[1 - D(t)]} - \int_{\tau_1}^t \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{1}{E(\tau)} + c(t, \tau) \right] \frac{\sigma(\tau)}{1 - D(\tau)} d\tau \quad (8)$$

式中  $c(t, \tau)$  为龄期  $\tau$  下的徐变度. 通常, 徐变损伤由两部分构成, 即对应于界面裂缝的损伤  $D_B$  和对应于砂浆裂缝的损伤  $D_M$ , 假设  $D_B$  与  $D_M$  互不耦合, 总损伤方程可以写为,

$$\left. \begin{aligned} D(\sigma, t) &= D(\sigma, 0) + D_{cr}(\sigma, t) \\ D_{cr}(\sigma, t) &= D_B(\sigma, t) + D_M(\sigma, t) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$D(\sigma, 0)$  为瞬时损伤. 根据持续应力与长期强度的关系确定了  $D_B$  与  $D_M$  后, 由 (8) 式和 (9) 式就可计算混凝土的长期徐变.

从徐变的加载特性看, 它与一次加载的静力损伤和在动力载荷下的损伤都不同, 即使在恒定的应力下, 徐变损伤依然是增加的, 因此, 徐变可以看作是随时间而缓慢变化的函数. 当用损伤来研究徐变时, 损伤也成为了时间的函数, 而这一时间可以是结构的整个服役期, 例如象混凝土大坝这样的结构在服役期内始终要承受水荷载的作用. 尽管整体结构一般不会由于徐变而导致破坏, 但徐变对结构和材料的削弱却是需要考虑的, 再加上混凝土实际的长期强度增长的耦合问题, 搞清楚混凝土的徐变损伤规律, 对于建立合理的维修理论和研究结构在服役期的时变可靠度的变化将是很有帮助的.

## 2 疲劳累积损伤研究<sup>[41~44]</sup>

混凝土结构的疲劳性能研究有着悠久的历史, 从上世纪初铁路钢筋混凝土桥梁的出现, 人们就开始了混凝土疲劳性能的研究. 但其后的近 70 年间, 对混凝土及其结构物的疲劳性能的研究与其它性能的研究相比并没有得到足够的重视. 这主要是由于绝大多数结构采用了静载设计的容许应力法进行设计, 而工作应力较低的事实实质上排除了混凝土结构发生类似于金属结构那样的因疲劳而发生破坏的可能性.

但一方面, 随着新的设计理论-可靠度理论的出现和发展, 用容许应力法设计结构的时代也就结束了, 人们开始认识到结构的安全度是一个随时间变化的过程量, 而非一个定值, 当结构在服役期间承受疲劳荷载的作用时, 其抗力会随着损伤的累积而降低, 从而导致可靠度的降低. 工程实践中对结构进行损伤评估和维修决策的迫切需要, 如对已服役一段时间并经历过地震作用的混凝土大坝的安全评定和维修等, 促使人们必须加强对结构疲劳累积损伤的研究.

另一方面, 随着混凝土结构应用的扩展, 一些新型结构(如重力式海洋平台、核电站混凝土保护层、大跨度钢筋混凝土桥梁和高等级公路路面等)和新型材料(如高强混凝土等)的出现, 使得许多结构或构件经常处于重复性的较高应力水平或温度频繁变化的工作状态下, 结构的疲劳破坏问题已不可避免, 深入研究混凝土结构由于疲劳累积损伤而造成的性质劣化的演化规律, 包括疲劳变形发展规律、刚度衰减规律和强度的衰减规律等, 同样成为结构控制、维修和可靠度研究的基础条件.

## 2.1 疲劳累积损伤理论研究

适当的累积损伤模型是正确描述结构或构件在循环荷载作用下疲劳累积发展过程, 进行结构抗疲劳设计的基础. 当前, 对材料累积损伤模型的研究主要围绕两种方法进行: 一种是通过疲劳试验的方法, 根据多级等幅疲劳试验的数据对  $S-N$  曲线的拟合得到的带有经验性质的累积损伤模型. 第二种就是基于连续介质损伤力学理论建立损伤模型的方法. 下面就列举说明一些具有代表性的模型.

### 2.1.1 线性累积损伤理论

Palmgren- Miner 准则是 Palmgren 在 1924 年首先提出的, Miner<sup>[45]</sup> 于 1945 年在研究铝合金的疲劳累积损伤中再次独立提出并将其公式化, 故也经常简称为 Miner 准则. 该准则假设, 损伤的累积与应力循环的次数成线性关系, 且当损伤累积达到 1 时材料发生疲劳破坏. 表示为:

$$D = \sum \Delta D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (10)$$

式中  $\Delta D_i$  是应力幅值为  $S_i$  的第  $i$  级等幅循环应力下的损伤指标,  $n_i$  为该级应力水平对应的循环次数,  $N_i$  为  $S_i$  下的疲劳寿命.

Miner 准则的表达式实际上隐含了以下假设, 即: (1) 在给定应力水平下, 每一次循环耗散的能量是相等的; (2) 累积损伤与以前的载荷历程无关; (3) 加载顺序不影响材料的疲劳寿命. 从这些假设可以看出, Miner 理论显著简化了疲劳累积损伤的机理. 材料在外载作用下的累积损伤是一个不可逆的劣化过程, 众多的研究表明,  $D$  与加载顺序、材料性质和载荷水平等因素的变化都有关系. 如试验显示, 对许多材料, 在高-低加载顺序下  $D > 1$ ; 在低-高加载顺序下  $D < 1$ . 同时, (10) 式所表述的能量耗散是一个抽象的概念, 与损伤并无直接的联系, 因此, 确切地说, 它应该是线性累积循环周比准则.

尽管 Miner 准则缺乏严谨的理论基础, 但研究表明<sup>[46]</sup>, 在一定力学条件下, 其线性累积循环周比关系在均值或中值意义上还是成立的, 加上形式简单, 便于使用, 仍是工程中应用最为广泛的累积损伤准则.

鉴于原始 Miner 准则存在的问题, 不少学者对它进行了修正和改造: 如 Hildorf<sup>[47]</sup> (1966), 周志祥和钟明全<sup>[48]</sup> 在试验数据的基础上对混凝土的 Miner 准则进行了修正. 另外, Manson 认为, 将疲劳损伤发展过程中的裂纹形成和裂纹扩展两个不同阶段用同一个线性累积损伤规律来描述, 不考虑加载顺序对两阶段损伤发展的影响是造成理论计算与试验结果差距的主要原因. 因此, 假设线性累积损伤对疲劳全过程不适用, 但对不同阶段, 线性累积损伤还是分别成立的, 基于此观点, 建立了 Manson 双线性疲劳累积损伤理论<sup>[49]</sup>, 但该理论由于难以确定两阶段的分界点, 不便于直接应用于工程实际.

### 2.1.2 非线性累积损伤理论

大量试验表明<sup>[50,51]</sup>, 混凝土的疲劳累积损伤规律呈现出非线性损伤的特点, 因此, 研究混凝土的非线性累积损伤模型是必要的. 但是, 由于混凝土材料的离散性较大等原因, 即使是对线性累积损伤的模型还没有一个定论, 因此, 目前的非线性累积损伤模型大多还是从金属材料中的模型借鉴而来. 其中比较具有代表意义的有:

Marco 和 Starkey<sup>[52]</sup> 的损伤模型提出在等幅加载下, 损伤随循环周比按幂函数关系变化:

$$D = \left(\frac{n_i}{N_i}\right)^{x_i}, x_i > 1 \quad (11)$$

式中  $x_i$  是与应力水平和加载顺序有关的常数. 该模型虽然对后人有较强的启发作用, 但很难定义  $x_i$ , 使其求解至今尚未解决, 因而(11)式只能作定性研究.

Henry<sup>[53]</sup> 基于疲劳损伤对材料  $S-N$  曲线的影响, 提出一种疲劳累积损伤模型, 该模型认为: 经过一定循环次数后, 受损材料的  $S-N$  曲线方程与无损材料的  $S-N$  曲线方程具有相同的形式, 只是曲线方程中的常数发生了变化. 也可以理解为受损材料的  $S-N$  曲线是无损材料  $S-N$  曲线发生某种移动的结果. 模型假设等幅  $S-N$  曲线形式为  $N(S-E) = k$ , 则等幅剩余  $S-N$  曲线为  $(N-n)(S-E') = k'$ , 由此可推出疲劳损伤为:

$$D = \frac{E-E'}{E} = \frac{n/N}{1 + [E(1-nN)]/(S-E)} \quad (12)$$

式中确定  $E, E'$  的试验量很大.

其它非线性模型还有 Corten- Dolan<sup>[54]</sup>、Subramanyan<sup>[55]</sup>、Leve<sup>[56]</sup> 及 Gatts<sup>[57]</sup> 等学者建立的疲劳累积损伤模型, 但总体上多具有模型比较复杂, 参数的确定比较困难的特点.

### 2.1.3 用宏观力学性质参量表述的累积损伤模型

除了直接用循环周比关系或循环寿命比来建立累积损伤法则的方法外, 许多学者利用损伤等效原理及材料的劣化是单调的不可逆过程等假设, 通过建立等幅及变幅疲劳损伤过程中宏观力学参量的劣化模型来对剩余疲劳寿命或强度进行估计.

用弹性模量<sup>[58]</sup>、剩余强度和变形来描述材料的累积损伤都是可行的. 但鉴于混凝土疲劳试验结果的离散性过大, 目前常用疲劳变形发展规律来确定疲劳失效准则, 并对疲劳寿命进行估计. 如王瑞敏<sup>[59]</sup>及姚明初<sup>[60]</sup>等人的疲劳变形公式, 均可用于估算剩余寿命.

### 2.1.4 基于连续介质损伤力学的疲劳累积损伤理论

与上述基于试验和统计分析的各种损伤模型相比, 应用连续介质损伤力学建立起来的疲劳累积损伤模型是在较为严谨的不可逆热力学和连续介质力学的理论框架之下建立起来的, 这类模型具有明确的数理概念, 突破了根据试验结果建立经验公式的传统方法, 具有广阔的研究前景. Chaboche<sup>[61]</sup>累积损伤理论就是其中一例.

该理论假设疲劳损伤与材料内部微塑性区的应变有关, 在每个循环中, 损伤增量为:

$$\frac{\Delta D}{\Delta N} = \{1 - (1 - D)^{1+\beta}\}^\alpha \left\{ \frac{\Delta \sigma}{M(1 - D)} \right\}^\beta \tag{13}$$

式中  $\alpha, \beta$  和  $M$  为与温度有关的材料常数, 并且  $\alpha = \alpha(\Delta \sigma)$ ,  $\sigma = M(\sigma_m)$ ,  $\Delta \sigma$  为应力变程,  $\sigma_m$  为平均应力. 由上式有:

$$D = 1 - \left\{ 1 - \left( \frac{N}{N_F} \right)^{\frac{1}{1+\alpha}} \right\}^{1+\beta} \tag{14}$$

式中  $N_F$  为疲劳破坏时的循环次数, 有:

$$N_F = N_F(\Delta \sigma \sigma_m) = (1 - \alpha)^{-1} (1 + \beta)^{-1} \left( \frac{\Delta \sigma}{M} \right)^{-\beta} \tag{15}$$

至此, 得到了与应力历程、循环次数以及材料参数密切相关的疲劳损伤应变方程, 该模型与疲劳破坏机理相吻合, 但对于预测复杂荷载作用下的剩余寿命和剩余强度的计算, 模型过于复杂, 工程应用不便. 基于连续介质损伤力学的疲劳累积损伤模型还有 Lemaitre 建立的分别对应低周和高周疲劳情况的模型<sup>[19]</sup>等.

### 2.1.5 高、低周疲劳研究

根据结构所受荷载类型的不同, 荷载分为高周低幅和低周高幅. 相应地材料或结构在疲劳失效前应力循环次数达到  $N = 10^4 \sim 10^7$  时, 称为高周疲劳, 如桥梁、海上平台和大多数金属结构及构件的疲劳模式, 这种模式的应力应变基本上在弹性范围内; 当应力循环次数  $N < 10^4$  时称为低周疲劳, 典型例子是结构承受地震荷载的作用, 在反复承受应力水平较高的荷载作用下, 应力应变进入了塑性范围, 累积损伤是由于累积塑性应变引起的.

前面所述的疲劳累积损伤模型, 除了基于连续介质损伤力学的疲劳累积损伤模型是根据明确的物理学概念建立的, 在模型中可以对高、低周疲劳有明确的描述以外, 其它模型, 特别是以累积循环周比关系建立的模型, 并没有明确指出适于何种情况. 人们利用这些模型, 结合不同寿命区的  $S-N$  曲线方程, 根据高、低周疲劳损伤的力学特点又进行了具有针对性的研究. 根据等幅疲劳试验数据, 有适应于高周疲劳的经典疲劳模型如 Basquin 方程:

$$NS_m = C \tag{16}$$

$S$  为应力幅值;  $m$  和  $C$  为由试验确定的常数. 如与线性累积损伤法则(10)式结合, 可对疲劳寿命进行估计. Manson 和 Coffin 分别独立提出的考虑低周疲劳的通用模型:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{S_f}{E} (2N)^b + \varepsilon_f (2N)^c \tag{17}$$

式中  $S_f$ ,  $\xi$  分别为疲劳强度系数, 在简化计算中可取静拉伸断裂时的真应力和真应变;  $b$  和  $c$  分别为疲劳强度指数和疲劳延性指数, 由试验确定.

对于低周特别是地震情况下的累积损伤模型主要是从变形和耗散能两个角度考虑的.

### (1) 变形累积损伤模型<sup>[62]</sup>

该模型用变形的累积来描述损伤模型, 表示为:

$$D = \left( \frac{\Delta_c - \Delta_0}{\Delta_u - \Delta_0} \right)^m \quad (18)$$

式中  $\Delta_c$  为计算值;  $\Delta_u$  为允许极限变形,  $\Delta_c > 0$  是损伤起始值, 即累积变形  $\Delta > \Delta_0$  时, 损伤开始发生;  $m$  为试验参数.

由于在低周疲劳下, 结构反应一般都进入弹塑性状态, 其反应历程都不是整循环的, 因此, 用半循环数来计算累积损伤比用整循环更合理一些. 基于少数次大幅值循环比多数次小幅值循环造成更大损伤事实的考虑, Krawinkler<sup>[63]</sup> 等提出按下式计算累积参数:

$$\Delta_c = A \sum_i \delta_i^b \quad (19)$$

式中  $\delta_i$  为第  $i$  个半循环的  $\Delta$  值;  $A$ 、 $b$  为低周疲劳试验参数.  $b > 1$  反映大幅值循环比小幅值循环造成更大损伤的事实.

### (2) Park- Ang 模型<sup>[64]</sup>

考虑到混凝土试验中滞回耗能也是造成损伤的一个重要因素, Park 和 Ang 提出了目前被广泛使用的, 同时考虑变形和能量的双参数累积损伤模型:

$$D = \frac{X_m}{X_p} + \frac{\beta}{Q_y X_u} \int_0 dE \quad (20)$$

式中  $X_m$  为结构最大反应位移;  $X_u$  为一次加载下的极限位移;  $Q_y$  为屈服强度;  $\int dE$  为累积塑性耗能.  $\beta$  为一个非负常数; 从混凝土结构在地震下破坏的力学分析可以知道, 同时考虑变形和能量耗散的模型将比单独只考虑变形或能量的模型更合理, 适应性更强.

## 2.2 概率疲劳累积损伤理论研究

从历史上看, 材料或结构的疲劳及累积损伤的研究主要是在两个层次进行的: (1) 用确定性的方法进行研究是以往研究的主要部分; (2) 随着可靠度理论在土木工程领域的广泛应用, 用概率的方法进行研究正越来越受到重视. 过去的研究主要是集中于在常幅或变幅加载下混凝土的  $S-N$  曲线及构件弯曲破坏特性等的研究, 但众所周知, 由于混凝土材料细观层次上的多相性和不均匀性造成的固有的离散性等原因, 使得混凝土的疲劳试验结果离散性很大, 在低寿命区, 试件间寿命偏差可达几倍或十多倍, 到了高寿命区甚至可达成百上千倍, 而且这些试验是在试验室中较理想条件下进行的. 到了实际工程中, 由于施工等原因造成的离散性会更大, 因此, 如果不用概率的方法对混凝土的疲劳累积损伤进行描述, 无法真正从宏观角度刻划混凝土的破坏机理和固有的离散性, 进而也将难以建立起切实有助于工程设计使用的有效方法.

笔者认为, 在进行混凝土的疲劳概率累积损伤的研究中要特别注意与金属材料研究的区别. 对于金属材料, 用于疲劳试验的试件很多就是实际结构中的部件, 而混凝土是离散性很大的非均质材料, 同时再考虑构件的尺寸因素, 就难以做到这一点, 因此, 对于  $S-N$ ,  $P-S-N$  曲线的理解和使用应有所区别, 因此, 重点应该放在对其宏观性质的劣化机理和规律的研究上, 如通过试验和工程实测相结合, 确定混凝土材料的宏观力学参数的概率模型(如剩余强度退化的概率模型等). 目前常用的寿命、强度概率分布模型为对数正态分布或 weibull 分布, 我们的一些研究显示, 对疲劳寿命和剩余强度, 三参数 weibull 分布的拟合都是最好的, 但要确定实际中的模型参数还有很多问题要解决. 值得注意的是, 混凝土结构的破坏是一个长期的损伤累积的过程, 不仅要视损伤累积为时间的函数, 同时损伤累积分布也是时间的函数, 因此, 合理地运用概率的方法研究混凝土的累积损伤需要对各种对象加以明确.

另一方面,混凝土结构在服役过程中承受的外界的荷载作用通常都是随机变量或者是随机过程.因此,研究混凝土结构的疲劳累积损伤要考虑两方面的随机性,一方面就是材料固有的随机性,另一类就是载荷的随机性.对于载荷作为随机过程处理,随着电液伺服系统的逐步成熟及数据采集和处理的自动化,已可以通过产生随机数的方法加以模拟,也可以直接输入实测随机荷载来研究混凝土的疲劳性能.由于混凝土的疲劳损伤过程和内部缺陷的发展是密切相关的,因此,要注意混凝土在随机荷载和在常幅或等幅荷载作用下的疲劳性能的差异.显然,要建立一个完全符合实际情况的疲劳累积损伤模型是比较困难的,特别对于一些自然界的作用(如地震等),每一个(种)随机过程都有所不同,而且象常幅疲劳试验那样进行大量的随机疲劳试验显然也是不现实的.因此,需要合理地把复杂荷载作用下的效应转换为等效的常荷载作用下的效应,从而可以充分利用已有的大量常幅疲劳试验的数据建立起混凝土在随机荷载作用下的损伤演变方程.

### 3 结束语

(1) 混凝土损伤机理的研究是混凝土结构损伤分析的基础,针对混凝土结构的工作环境和其材料特性,虽然主要关心的应是其宏观性质的变化,但要真正、全面地解决混凝土的损伤问题,应该把唯象的方法和细观的方法结合起来,也就是需要把力学的研究和材料(从细观层次)的研究结合起来,目前这方面的研究在混凝土材料中还开展得不够.

(2) 目前混凝土的损伤研究,在理论上已逐步从简单应力情况发展到了多向或复杂应力情况,但由于试验设备和条件的限制,试验研究还主要围绕简单应力情况进行.因此,许多理论难以得到验证,并阻碍了损伤理论在混凝土结构中的应用和发展,笔者认为,这一矛盾可以通过加强对在建和已建结构性能的变化加以解决,如在结构中预埋入一定的仪器,通过数据采集转化为结构在一定荷载作用下或一定时间内的宏观力学性质的变化(如强度、刚度或弹性模量的退化)从而可以研究实际结构的劣化规律并检验和推动混凝土损伤理论的进展.

(3) 一些新型结构的出现使得对中高强混凝土的损伤研究在广泛范围内受到关注并已取得了一定成果,但实际上,许多大体积混凝土结构(如大坝、海岸结构等),由于结构的特点只能采用低强混凝土建造,而这些结构的劣化导致安全度的降低将对人们的生命、财产造成极大的隐患,低强混凝土与中、高强混凝土相比其脆性有所降低,而延性有所增加,因此其损伤特性将有所不同,因此加强对低强混凝土的损伤研究对于结构的安全评估和全面了解混凝土的物理、力学性质都是必要的.

(4) 由于对混凝土及结构的损伤机理的深入认识和可靠度理论的应用,人们已经把研究兴趣更多地从对承载极限转移到使用极限状态上来.如何逐步地把损伤研究和可靠度理论结合起来,并在实践中加以应用,是提高结构设计水准的重要途径.

#### 参考文献:

- [1] 郭少华. 混凝土破坏理论研究进展[J]. 力学进展, 1993, 23(4): 520~ 529.
- [2] Kaplan. M. F. ACI J. [J], 1961, 58: 575.
- [3] Fanella D, Krajcinovic D. Size effect in concrete[J]. J. Eng. Mech., ASCE, 1988, 114(4).
- [4] Glucklich J. J. Engng[J]. Mech. Div. ASCE, 109, 1983: 127.
- [5] 夏蒙禁, 韩闻生等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变(1)[J]. 力学进展, 1995, 25(1): 1~ 40.
- [6] Kachanov L. M. Time of the rupture process under creep conditions[J]. TVZ Akad. Nauk. S. S. R. Otd. Tech. Nuak. 1958, 8.
- [7] Rabonov Y. N. Creep rupture[C], Proc. 12, Inter. Congress, Appl. Mech. Stanford, Springer Berlin, 1969.
- [8] Leckie F A, Hayhurst D R. Creep rupture of structure[C]. Proc. R. Soc. A 340, 1974.
- [9] Hult J. Damage induced tensile instability[C]. Trans. 3rd AMIRT, London, 1975.
- [10] Lemaitre J. Application of damage concepts to predict creep-fatigue failure[C]. J. Eng. Mat. Tech, ASME, 1979, 101(1): 202~ 209.
- [11] Kojcinovic D. Continuum damage theory of brittle materials[J]. J. Appl. Mech. 1981(48); 809~ 824.
- [12] Sidoroff F. Discription of anisotropic damage application to elasticity[C]. IUTAM Colloquium, Physical Nonlinearities in structural analysis, 1981: 237~ 244.



- [13] 余天庆, 钱济成. 损伤理论及其应用[M]. 国防工业出版社, 1993.
- [14] 高路彬. 混凝土变形与损伤的分析[J]. 力学进展, 1993, 23(4): 510~ 519.
- [15] Slate F O, Okefski[J]. ACI J, 1963(60): 575.
- [16] Shah S P, Chandra S. Critical stress volume change and microcracking of concrete[M]. ACI J, 1968(65): 770~ 781.
- [17] Chen W F. Plasticity in reinforced concrete[M]. McGraw - Hill, New York, 1982.
- [18] Dougill J W, et al. J. Eng[J]. Mech. Div, ASCE, 1976(102): 333.
- [19] J. 勒迈特著, 倪金刚, 陶春虎译. 损伤力学教程[M]. 科学出版社, 1996.
- [20] Loland K E. continuous damage model for load response estimation of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1980(10): 392~ 492.
- [21] Mazarz J. Application de la mecanique de l'endommagement au comportement non lineaire et la rupture du beton de structure[C]. The ede Doctorat d'Etat. Univ. Paris, 1984.
- [22] 余天庆. 混凝土的分段线性损伤模型[J]. 岩石、混凝土断裂与强度, 1985(2): 14~ 16.
- [23] 钱济成, 周建方. 混凝土的两种损伤模型及其应用[J]. 河海大学学报, 1989(3): 40~ 47.
- [24] Supartono F, Sidroff F. Anisotropic damage modeling for brittle elastic materials[C]. Symposium of Franc- Poland, 1984.
- [25] Kacijinovic D. Constitutive equation for damaging materials[J]. J. Appl. Mech, 1983(50): 355~ 360.
- [26] Gao Lubin, Cheng Qingguo. An Anisotropic damage constitutive model for concrete and its applications[M]. Applied Mechanics, International Academic Publisher, Beijing, 1988: 578~ 583.
- [27] 清华大学抗震抗爆工程研究室. 钢筋混凝土结构构件在冲击荷载下的性能[J]. 科学研究报告集第四集, 清华大学出版社, 1986.
- [28] Rusch H. ACI J[J], 1960(57): 1.
- [29] Mindess S, et al. Am. Cer. Soc[J]. Bull, 1977(56): 429.
- [30] Sauris W, Shah S P. J. Eng[J]. Mech. Div, ASCE, 1984(10): 985.
- [31] Bui H O, Ehrlicher A. ICF- 5[C], Cannes, 1983(1): 86.
- [32] Brooks J J., Al- Samamie N. V. Fracture of concrete and Rock. S. P. Shah Ed[M], Elsevier Applied Science, 1989: 397~ 408.
- [33] 李庆斌, 张楚汉等. 单压状态下混凝土的动力损伤本构模型[J]. 水利学报, 1994(3): 85~ 89.
- [34] 李庆斌. 混凝土静、动力双剪损伤本构模型[J]. 水利学报, 1995(2): 27~ 34.
- [35] 阿鲁久涅扬 H X. 蠕变理论中的若干问题[J]. 科学出版社, 1961.
- [36] 林南熏. 混凝土非线性徐变理论问题[J]. 土木工程学报, 1983, 16(1): 14.
- [37] Bazant Z P, Asghari A A. Constitutive law for nonlinear creep of concrete[J]. J. Eng. Mech. Div, 1977(2): 113~ 124.
- [38] Lemaitre J. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Eng. & Design, 1984(80): 233~ 245.
- [39] Piechnik S, Pachla H. The continuous field of damage and its influence on the creep process in concrete under tensile loading[C]. IUTAM, 3rd Symp. On Creep in Structure, 1980: 202~ 219.
- [40] 李兆霞, 钱济成. 混凝土徐变损伤演变方程及其在非线形徐变理论中的应用[J]. 河海大学学报, 1989, 17(2): 26~ 34.
- [41] 欧进萍, 吴波. 结构概率累积损伤理论与应用[J]. 国家自然科学基金青年专家研讨会论文, 结构工程科学, 哈尔滨, 1992: 54~ 71.
- [42] 杨德滋, 钟明全. 混凝土结构疲劳性能研究现状及趋势[C]. 国家自然科学基金青年专家研讨会论文, 结构工程科学, 哈尔滨, 1992: 72~ 77.
- [43] 鞠扬, 樊承某. 疲劳累积损伤理论研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1994, 27(5): 115~ 120.
- [44] 林燕青. 混凝土疲劳累积损伤与力学性能劣化研究[C]. 博士学位论文, 哈尔滨建筑大学, 1998. 5.
- [45] Miner M A. Cumulative damage in fatigue[J]. J. Appl. Mech. 1945, 12(3): A 159~ A 164.
- [46] 倪侃. 随机疲劳累积损伤理论研究进展[J]. 力学进展, 1999, 29(1): 43~ 65.
- [47] Hilsdorf, et al. Fatigue of concrete under varying flexural stresses[J]. ACI J, 1966, 63(10): 1059~ 1075.
- [48] 周志祥, 钟明全. 混凝土在变幅疲劳荷载下累积损伤理论的探讨[C]. 国家自然科学基金青年专家研讨会论文, 结构工程科学, 哈尔滨, 1992: 88~ 95.
- [49] Manson S. S, et al. Re- examination of cumulative analysis- An engineering prospective[J]. Engng. Frac. Mech, 1986(25/26).
- [50] Jan Ove Holmen. Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading[J]. Fatigue Strength of Concrete Structures, SP- 75 ACI, 1982: 71~ 110.
- [51] Byung Hwan Oh. Cumulative damage theory of concrete under variable amplitude fatigue loading[J]. ACI M J, 88(1), 1991: 41~ 48.
- [52] Marco S M, Starkey W J. A concept of fatigue damage[C]. Trans ASME, 1954, 76: 627~ 632.
- [53] Henry D L. A theory of fatigue damage accumulation in steel[C]. Trans ASME, 1955, 77: 913~ 918.
- [54] Cortan H T, Dolan T L. Cumulative fatigue damage. Proceed of the Inter[C]. Confer. on Fatigue of Metals. IME and ASME, 1956.
- [55] Subramanyan S. A cumulative damage rule based on the knee point of the S- N curve[C]. J. of Eng. Mats. and Mech. 1976.
- [56] Leve H L. Cumulative damage theories[M]. Metal Fatigue. Theory and Design. A. F. M adayay, Ed., 1960.
- [57] Gatts R R. Application of a cumulative damage concept to fatigue[J]. ASME, 83, Series D, 1964(4).

- [58] 张滨生, 朱照宏. 水泥混凝土路面的疲劳损伤分析[J]. 土木工程学报, 1986, 19(4).
- [59] 王瑞敏, 赵国藩, 宋玉普. 混凝土的受压疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 1991(4): 38~ 47.
- [60] 姚明初. 混凝土在等幅和变幅重复应力下疲劳性能的研究[R]. 铁道部科学研究院研究报告, 1990.
- [61] Chaboche J L, Lemaître J. A nonlinear model of creep- fatigue damage cumulation and interaction[C]. Proceeding of IUTAM Symposium of Visco- elastic Media and Bodies, Springer- verlag, 1974.
- [62] Powell G H, Allahabadi R. Seismic damage prediction by deterministic methods: concepts and procedures[J]. Earthquake Eng. Struct. Dyn. 1988(16): 719~ 734.
- [63] Krawinkler H, Zohrei M. Cumulative damage in steel structure subjected to earthquake ground motions[J]. Computer and Structures, 1983, 16(1~ 4): 531~ 541.
- [64] Park Y J, A. H- S. Ang. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete[J]. J. Struct. Eng., ASCE, 1985, 111(4): 740~ 757.

## A Summary of Research on Damage of Concrete

FENG Bo- hao<sup>1</sup>, ZHANG Li- xiang<sup>1</sup>, LI Gu- qing<sup>2</sup>

(1. The Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430029, China)

**Abstract** In this paper, the researches of concrete damage is completely reviewed, and the future researching trends in this field are discussed. The main contents are focussed on damage mechanisms of concrete material, static and dynamic damages, creep damage, high- cycle and low cycle fatigue cumulative damages, probabilistic cumulative damage etc.

**Key words:** concrete; damage; constitutive model