

# 损伤力学理论应用于土木工程研究进展

任晓丹

同济大学土木工程学院, 上海 200092

**摘要** 过去30年间,中国的土木工程建设取得了长足的发展,支撑了国家的社会经济持续进步。在经济新常态的大背景下,土木工程行业的发展也表现出新的特点,在强调生产要素的同时也开始重视基础理论和核心技术;土木结构的非线性分析问题,作为土木结构领域的核心科学和技术问题,再次得到行业的重视;结构非线性分析的核心环节,材料本构关系的理论建模和理论实现,得到了学术界和工程界的关注。以基于损伤力学理论的混凝土类脆性材料的本构关系模型为切入点,分析了损伤力学理论的发展,展示了损伤力学模型的验证过程,基于若干典型案例阐释了损伤力学理论在土木工程领域的应用,以及损伤力学理论在生物力学方面的扩展应用。

**关键词** 损伤理论;非线性分析;土木工程

中国的土木建筑行业是国民经济的支柱产业,尤其在过去几十年的发展过程中,土木建筑作为国民经济发展的重要载体,始终支撑着经济的发展和社会的进步。从宏观经济角度讲,对土木建筑等基础设施的投资可以拉动国民经济多个部门的发展,投资溢出效应显著。同时,土木建筑行业已经形成了大量优质产能,这些产能的对外输出已经成为“一带一路”的重要支撑。另一方面,土木建筑行业一直被认为是要素驱动的行业,这就决定了在这个行业对于基础理论创新和核心技术研发的要求与

其他高新产业相比相对较低。虽然我们具备大量优质产能,但是这些产能的核心竞争力大多来源于投资效率、人口红利、管理机制和技术集成。所以,虽然土木工程的基础是数学、力学、材料学等基础学科,但是土木工程行业对这些基础学科的贡献度并不高,而更多的是把其他领域的新理论、新技术等引进到土木学科加以应用。

最近10年以来,中国国民经济的发展进入“新常态”,各个行业的发展范式都在发生着变化,土木工程行业也并不例外。首先,重大工程的兴建、建

收稿日期:2019-10-31;修回日期:2020-07-13

基金项目:国家自然科学基金项目(2078361,51678439)

作者简介:任晓丹,副教授,研究方向为损伤理论与结构计算方法,电子信箱:rxdtj@tongji.edu.cn

引用格式:任晓丹. 损伤力学理论应用于土木工程研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(15): 84-94; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.15.009

筑工业化的深度发展和智能建造的兴起,都向工程技术提出了全新的要求,这些要求无不需深度的理论创新和技术研发。其次,工程技术行业正在经历着深度的整合和调整,效率优先的发展理念已经不能满足“新常态”背景下的发展需要,而服务优先的理念已经得到越来越多的认可,工程技术行业的服务能力和技术实力是互为表里的。另外,对外的项目交流使得我们越来越认识到基础理论和核心技术的重要性。以往中国遇到重大项目问题依赖于专家的研究和研判,而国外则更重视基于先进技术的实验、分析和模拟结果。

长期以来,土木结构的分析和设计通常采用三段论的方式:采用线弹性分析方法确定结构的内力;采用极限状态分析的方法确定构件和截面的承载力;通过比较线弹性分析得到的内力和极限状态分析得到的承载力来确定结构的安全性。这种三段式的理论体系是历史发展的必然产物,在缺乏结构分析手段的条件下发挥了不可替代的作用。而另一方面,由此带来的结构整体线性分析与构件(截面)非线性分析之间的矛盾却也构成了现行结构设计理论的主要矛盾,并且已经为大多数结构设计师和研究者所明确。由于结构线弹性分析的过程乏善可陈,基于此体系建立起来的结构设计规范就将主要篇幅集中在构件(截面)的极限状态分析中,这就使得其实质上成为了“构件计算规范”。因此,在要素集中的发展过程中,技术和理论的创新并没有得到应有的重视。

在经济“新常态”的大背景下,随着本构关系理论、数值分析方法和计算机软硬件的长足进步,人们对建立具有工程实用性的结构非线性全过程分析方法充分重视。而一批支撑国民经济发展的重大工程结构的兴建,也对结构非线性全过程分析方法提出了迫切的工程需求。如何在结构设计的过程中,合理考虑结构的整体非线性性能,形成具有内在一致性的结构非线性分析和设计的理论体系,成为目前土木工程领域的首要课题。而以此为出发点,最新版颁布实施的《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)(以下简称《规范》)迈出了从“构件计算规范”到“结构设计规范”的关键步伐,增加

了“结构方案”及“结构分析”的有关内容。

在结构分析和模拟过程中,本构关系的建模和实现是关键性环节,同时也对理论和技术有着很高的要求。一般而言,材料的本构关系是指在外部作用下应力与应变之间的物理关系。由于本构关系描述了材料的基本力学性质,因此,它构成了研究构件和结构在外部作用下的变形及运动的基础,在结构的力学行为研究中居于核心地位。针对结构破坏问题,本构关系需要从材料层面包含对于材料损伤和破坏的描述。经过长期的研究发现,损伤理论是混凝土类伪脆性材料本构关系建模的合理选择。

## 1 损伤理论

### 1.1 损伤概念的引入及一维模型

损伤力学诞生于20世纪50年代,Kachanov<sup>[1]</sup>最早提出“固体失效前的渐进式破坏”的概念,并将其应用于金属蠕变失效的研究中。其后经过Robertson<sup>[2]</sup>、Lemaitre<sup>[3]</sup>以及Chaboche<sup>[4]</sup>等先驱的不断发展,至20世纪70年代中期,损伤力学的理论框架逐步形成,并且在金属以及复合材料方面取得了广泛的应用。1976年,Dougill<sup>[5]</sup>首次将损伤的概念引入了混凝土力学的研究中,基于渐进断裂(progressive fracture)的概念研究了混凝土的破坏问题。

在外力作用下,混凝土、岩土类伪脆性材料的破坏过程对应于其中裂缝的产生、发展和交叉的过程。由于裂缝对材料的削弱作用,伪脆性材料的受力力学行为表现出典型的软化和弱化的特点。典型的实测混凝土应力-应变曲线分为4个主要阶段,如图1所示:初始线性段、非线性段、峰值之后的下降段、收敛段。

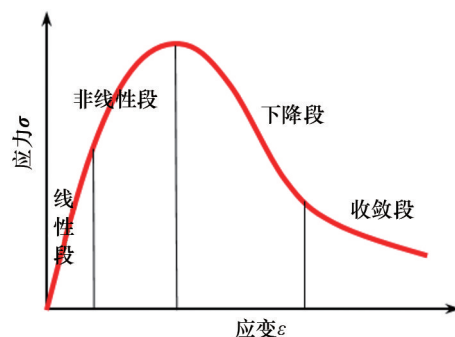


图1 典型混凝土单轴受力应力-应变曲线

降段和平稳段。除了在第一阶段混凝土的弹性刚度基本不变之外,后续几个阶段混凝土的刚度均表现出了渐进式的减小趋势。而这种渐进式的刚度退化即为裂纹造成的材料软化行为的外在体现。

在线性阶段,混凝土的应力-应变关系可以借助初始弹性模量  $E_c$  作为比例系数,采用线性表达式表示,即

$$\sigma = E_c \varepsilon \quad (1)$$

式中,  $\sigma$ 、 $\varepsilon$  分别为应力和应变。

当加载超过线性阶段进入后续的非线性阶段,由于裂缝的产生、扩展和交叉,混凝土将表现出明显的软化特性,体现在本构关系上,可以认为混凝土的弹性模量随着加载而持续减小,称为刚度退化。那么可以在式(1)的基础上引入折减系数来考虑这种刚度的退化,于是得到应力-应变关系表达式

$$\sigma = \omega E_c \varepsilon \quad (2)$$

式中,  $\omega$  称为材料的完整性(integrity)系数,取值范围为[0,1],取1时表示材料未破坏,取0时表示材料完全破坏。

与材料的“完整性”相对应的,是材料的“破损性”(brokenness),即材料的破坏程度,可以用与材料完整性系数相对应的材料损伤因子  $d$  表示,二者之间的关系为

$$d = 1 - \omega \quad (3)$$

由式(3)可以看出,损伤因子  $d$  的取值范围也为[0,1],损伤因子取0表示完全没有损伤,材料完好;取1表示完全损伤,材料刚度降为0。

由于理论分析及工程设计中对于材料的破坏和破损更为关心,所以通常采用损伤因子表示本构关系。将式(3)代入式(2),可得损伤本构关系为

$$\sigma = (1 - d) E_c \varepsilon \quad (4)$$

当然,混凝土的损伤和破坏并不是突然产生的,而是随着加载的过程逐渐发展的,所以损伤变量也不是一个固定的数值,而是随着加载过程呈现渐进式变化。对于单轴加载,损伤变量可以定义为单轴应变的单调递增函数,即

$$d = f(\varepsilon) \quad (5)$$

其中,函数  $f(\cdot)$  的表达式通常是采用分析或实测所

得应力  $\sigma$  与应变  $\varepsilon$  的关系曲线,通过式(4)反解得到。

现行《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)中建议采用带损伤的单轴混凝土本构关系,即是在规范 GB50010—2002 建议混凝土单轴受拉与受压本构关系曲线的基础上,利用式(4)将其等价整理为损伤表达形式后建立的。而规范 GB50010—2002 建议的混凝土单轴受拉与受压本构关系,是在中国学者过镇海教授研究成果的基础上定型的。

## 1.2 经典损伤理论框架

混凝土、岩土类伪脆性材料最具代表性的特点之一,是其在拉应力和压应力作用下表现出迥异的强度与刚度特性。针对这一特点,Ladeveze<sup>[6]</sup>定义了受拉、受压2个损伤变量,并进一步对应力张量进行正负分解,认为正应力引起受拉损伤,负应力引起受压损伤,而复杂加载时的损伤则为二者的组合。这种损伤的二元表达形式后来被证明普遍适用于混凝土类伪脆性材料。1986年,Mazars<sup>[7]</sup>基于Ladeveze<sup>[6]</sup>提出的应力张量分解的思路,进一步引入弹性损伤能释放率建立损伤准则,建立了较为完整的混凝土弹性损伤理论,为混凝土损伤力学的进一步发展奠定了基础。应力张量正负分解、以及将与损伤变量对偶的损伤能释放率作为基本变量建立损伤演化法则的建模思路,对混凝土损伤力学的发展产生了深远的影响,成为后续混凝土损伤建模的标准工具。

除了损伤引起的软化、弱化效应外,混凝土在进入非线性后还会产生明显的塑性变形,特别是对于承受反复荷载的混凝土构件和结构,塑性变形对其整体非线性行为的影响十分显著。20世纪80年代中期以来,一批研究者试图突破弹性损伤的理论框架,将塑性应变及其演化规律引入到损伤本构关系的建模过程中,以期能够反映混凝土材料的残余变形。Simo和Ju统一了应力空间与应变空间连续损伤理论<sup>[8-9]</sup>,提出了基于能量的损伤力学理论框架<sup>[10]</sup>,奠定了弹塑性损伤理论的热力学基础<sup>[11]</sup>,并建议采用有效应力空间塑性力学描述材料的塑性变形。Faria等<sup>[12-13]</sup>则在张量分解与有效应力空

间塑性力学的基础上,完整构建了适用于混凝土材料的双标量弹塑性损伤理论,推导了四阶张量投影算子与率投影算子的表达式,系统进行了弹塑性损伤本构关系的数值模拟与模型验证。吴建营、李杰从考虑损伤和塑性的耦合效应入手<sup>[14-15]</sup>,引入弹塑性 Helmholtz 自由能势表达式,基于损伤能释放率建立损伤准则,形成了具有严格热力学基础的双标量弹塑性损伤模型<sup>[16-17]</sup>。对比研究<sup>[18-19]</sup>表明,吴-李模型能够模拟混凝土的主要非线性行为,其数值算法相对简单,计算效率能够满足大型混凝土结构非线性分析的需要,在理论性和实用性上取得了较好的统一。

类比一维损伤表达式并引入张量表达,多维弹塑性损伤本构关系的统一表达式为

$$\boldsymbol{\sigma} = (\mathbf{I} - \mathbf{D}) : \bar{\boldsymbol{\sigma}} \quad (6)$$

式中, $\boldsymbol{\sigma}$ 、 $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ 分别为柯西应力张量和有效应力张量; $\mathbf{I}$ 为四阶单位张量; $\mathbf{D}$ 为四阶损伤张量。

有效应力为未损伤材料在弹性变形作用下引起的应力,其表达式为

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{E}_0 : \boldsymbol{\varepsilon}_e \quad (7)$$

式中, $\mathbf{E}_0$ 为初始未损伤材料弹性刚度张量; $\boldsymbol{\varepsilon}_e$ 为弹性应变,其表达式为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_e = \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_p \quad (8)$$

式中, $\boldsymbol{\varepsilon}_p$ 为塑性应变,其演化规律的建模可借鉴经典塑性力学理论,表达式为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p = \dot{\lambda}_p \frac{\partial F_p(\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \boldsymbol{\kappa})}{\partial \bar{\boldsymbol{\sigma}}} \\ \dot{\boldsymbol{\kappa}} = \dot{\lambda}_p \mathbf{H} \\ F \geq 0, \dot{\lambda}_p \geq 0, \dot{\lambda}_p F \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $F$ 、 $F_p$ 分别为屈服准则和塑性演化势函数; $\boldsymbol{\kappa}$ 为塑性变量(矢量); $\mathbf{H}$ 为硬化变量(矢量)。

同时,为了更好地与实验结果对应,也可以采用经验塑性模型<sup>[20]</sup>。

为考虑混凝土在拉应力与压应力作用下所表现出的不同的损伤破坏特性,将损伤张量分解为受拉、受压两部分,则表达式为

$$\mathbf{D} = d^+ \mathbf{P}^+ + d^- \mathbf{P}^- \quad (10)$$

式中, $d^+$ 、 $d^-$ 分别为受拉损伤变量和受压损伤变量; $\mathbf{P}^+$ 、 $\mathbf{P}^-$ 分别为受拉和受压四阶投影张量,可以基于

有效应力的分解建立相应表达式<sup>[16]</sup>。

根据任晓丹等<sup>[21]</sup>的研究,多维应力状态下的损伤演化可以借鉴一维应力状态下的损伤演化函数(式(5)),其表达式

$$\begin{cases} d^+ = f^+(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{eq}^+) \\ d^- = f^-(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{eq}^-) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{eq}^+$ 、 $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{eq}^-$ 为能量等效应变,是基于多维应力状态求出的与一维应力状态在能量角度上等效的应变,是多维损伤演化与一维损伤演化联系的桥梁。

### 1.3 新型损伤理论

混凝土、岩石等材料是典型的非均匀材料,其细观结构具有典型的随机性,这种随机性对于其中微裂缝群的演化有着深刻的影响,进而也影响到材料的宏观损伤演化<sup>[22]</sup>。所以在混凝土的细观损伤建模过程中,微结构的随机性影响不容忽视。现有的细观损伤理论,还不能具象地直接考虑混凝土随机微结构中微裂缝的形成和扩展,而采用抽象的方式,则可以考虑微结构的随机性及其对宏观损伤演化的影响。1996年,Kandarpa等<sup>[23]</sup>将弹簧的破坏强度用连续的随机变量表示,并且通过随机场的相关性考虑相邻缺陷之间的相互影响,建立了基于弹簧模型的混凝土单轴受压随机损伤本构模型。后来,李杰等对Kandarpa模型做出了系列的改造,采用细观尺度意义上断裂应变服从某类概率分布的微弹簧模型来表征基本细观单元<sup>[22]</sup>,逐步发展了两类细观随机断裂-滑移模型<sup>[24]</sup>,较好地解决了非线性与随机性的综合反映问题。另一方面,微弹簧模型是一种抽象细观模型,它从一定程度上反映了损伤导致应力重分布的物理本质,但由于这种反映是笼统而抽象的,其模型参数的识别必然有赖于对实验数据的拟合。

根据李杰和任晓丹<sup>[21]</sup>的研究,随机损伤演化可以表达为

$$\begin{cases} D^+(\boldsymbol{\varepsilon}^{e+}) = \int_0^1 \mathbf{H}[\boldsymbol{\varepsilon}^{e+} - \Delta^+(x)] dx \\ D^-(\boldsymbol{\varepsilon}^{e-}) = \int_0^1 \mathbf{H}[\boldsymbol{\varepsilon}^{e-} - \Delta^-(x)] dx \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\mathbf{H}(\cdot)$ 为 Heaviside 函数; $\Delta^\pm(x)$ 为细观断裂应变随机场,表达了材料非均匀性引起的细观材料性质

的随机性,是损伤演化的随机来源。

基于随机分析方法,可以运用式(12)求解损伤的均值演化、方差演化和密度演化<sup>[25]</sup>。引入能量等效应变<sup>[21]</sup>,则式(12)可以进一步用于多维应力状态下的随机损伤演化。

在动力、冲击荷载作用下,材料的非线性行为及损伤演化与静力加载条件下有很大不同。这种材料的力学行为与加载速率有关的性质称为率敏感性。根据以往大量实验结果可以得知,混凝土、岩土类材料都具有显著的率敏感性。材料率敏感性的准确模拟是结构动力灾变分析能否成功的关键性控制因素。在弹塑性损伤理论框架内,一般认为率敏感性与材料的损伤演化与塑性演化均有密切关系,需在各自的子空间分别加以考虑。同时,在建模过程中需要考虑静力加载和动力加载的平滑过渡,即静力加载作为动力加载的特殊情况包含在动力模型中。

在损伤子空间,考虑率敏感效应的动力损伤演化表达式最早由Ju<sup>[10]</sup>类比粘塑性力学的基本公式建立。后来,Cervera等<sup>[26]</sup>对Ju提出的表达式进行了简化,构造了考虑加载速率影响的损伤乘子显式表达式,建立了相应的数值算法,并将模型应用于混凝土大坝的动力分析。显式表达动力损伤演化,也可以写成类似于静力损伤演化函数(式(11)),其表达式为

$$\begin{cases} d^+ = f^+(r_d^+) \\ d^- = f^-(r_d^-) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $r_d^+$ 、 $r_d^-$ 为动力损伤演化驱动力。

考虑材料率敏感性,引入动力演化方程

$$\begin{cases} \dot{r}_d^+ = \gamma^+ H\left(\frac{r^+}{r_d^+} - 1\right) \cdot \left(\frac{r^+}{r_d^+} - 1\right)^{n^+} \\ \dot{r}_d^- = \gamma^- H\left(\frac{r^-}{r_d^-} - 1\right) \cdot \left(\frac{r^-}{r_d^-} - 1\right)^{n^-} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\gamma^+$ 、 $\gamma^-$ 、 $n^+$ 、 $n^-$ 为材料参数; $r^+$ 、 $r^-$ 为静力损伤演化驱动力,可采用能量等效应变历史最大值<sup>[27]</sup>。

对于塑性应变的率敏感性的考虑,类比Perzyna黏塑性理论,建立有效应力空间黏塑性力学的基本公式,即

$$\dot{\epsilon}_{vp} = \gamma_p \langle \psi(F_p) \rangle \frac{\partial F_p}{\partial \bar{\sigma}} \quad (15)$$

$$\psi(F_p) = \left[ \frac{F_p(\bar{\sigma}, \kappa)}{C(\kappa)} \right]^{n_p} = \left[ \frac{F_p(\bar{\sigma})}{C(\kappa)} - 1 \right]^{n_p} \quad (16)$$

式中, $\dot{\epsilon}_{vp}$ 为黏塑性应变率; $\gamma_p$ 为黏塑性流动参数; $n_p$ 为黏塑性模型的幂指数; $\langle \cdot \rangle$ 为Macaulay括号。

研究者在大量结构和材料破坏的事件中逐渐认识到,结构宏观尺度的损伤、变形和破坏来源于材料细观尺度的非均匀性、裂纹扩展以及裂纹间相互作用,这就触及到了损伤的多尺度特征。一些在宏观尺度很难解决的问题,往往必须借助于细观尺度研究结果的支撑。在损伤力学领域,宏观连续损伤演化与细观裂纹扩展之间的内在关联一直是研究者关心的核心问题。近年来,基于多尺度思想研究和建立新一代损伤理论,成为损伤力学的一个热点。另一方面,实践推动理论创新,核设施、大型水利设施以及新能源设施等基础设施的设计和建造对材料模型和分析手段提出了新的要求,推动了徐变损伤、疲劳损伤、温度损伤和环境损伤等方面的研究进展。

## 2 实验验证

实验验证是理论模型能用于工程实践的必由之路。对于损伤理论,必须基于实验数据开展系统的验证、改进工作,才能最终应用于工程结构的分析和设计。本文仅基于几组简单受力条件下的结果展现损伤模型的特点和特征。

采用李杰等<sup>[28]</sup>的实验成果对损伤理论在单轴单调加载条件下的行为进行验证,结果如图2、图3所示,损伤模型可以捕捉材料在单轴受力全过程的非线性行为,具有较高精度。对于单轴重复加载,采用Karsan等<sup>[29]</sup>在单轴重复受压实验中得到的应力-应变全过程曲线进行验证,结果如图4所示,对于上升段的硬化和软化、下降段的刚度和残余应变均反映良好。

在动力加载作用下,衡量应变率效应的重要指标是动力强度提高因子(dynamic increase factor, DIF),定义为匀速加载所得动力强度与静力强度

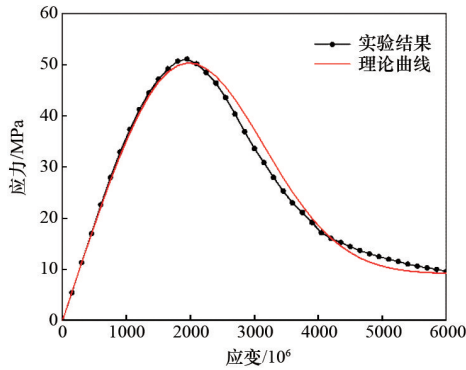


图2 单轴受压应力-应变曲线

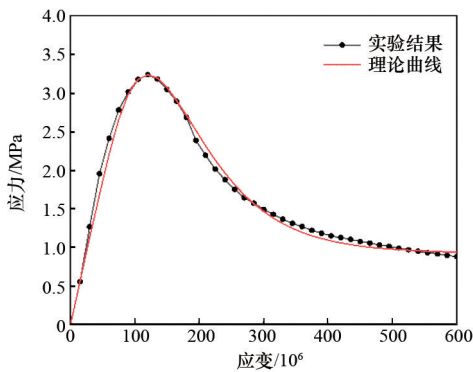


图3 单轴受拉应力-应变曲线

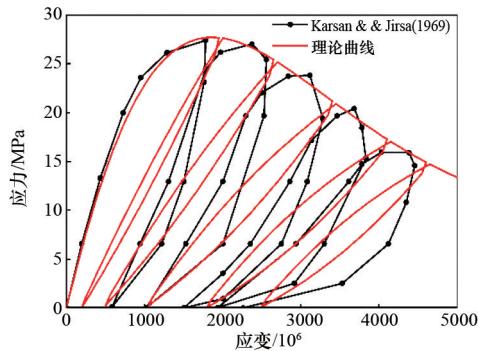


图4 单轴重复加载曲线对比

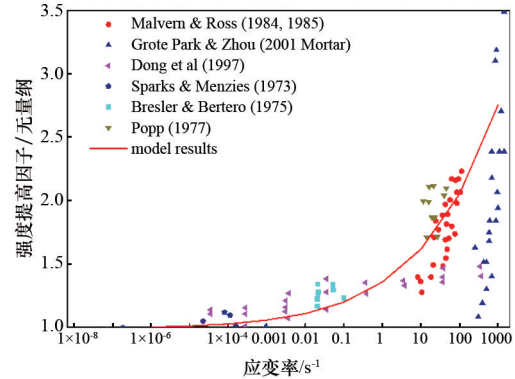


图5 单轴受压动力强度提高系数

有系统的实验数据支撑,图6所示的离散点即为实验数据点。可以看出,实验数据兼具规律性和离散性,确定性模型不能描述实验数据的离散性。引入随机损伤演化模型,采用随机分析技术,求解了二维强度的包络图的均值和方差(图6)中。可以看出,均值曲线很好地反映了实验数据的整体规律,而均值加、减1倍方差很好地覆盖了实验数据的离散范围。

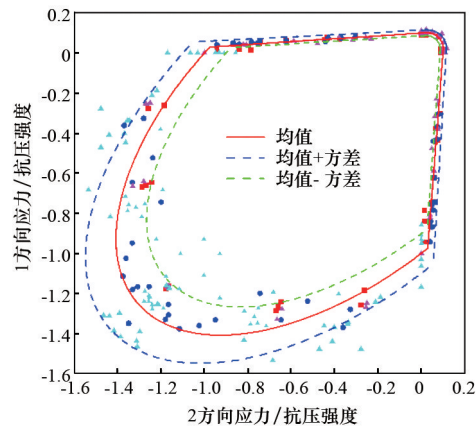


图6 二轴强度包络图

的比值。一般而言,动力强度提高因子大于等于1,是应变率的函数。动力损伤模型计算得到的动力强度提高因子与实验结果的对比如图5<sup>[30-34]</sup>所示。虽然不同的实验结果之间因为实验条件的差异呈现出一定程度的离散性,模型计算所得结果仍然能够反映实验结果的整体趋势。

实际结构中,材料往往处于多维应力状态。对于混凝土材料,二维应力状态下的材料非线性行为往往用其二维强度包络图表示,二维强度包络图也

### 3 应用案例

从材料本构关系出发到结构非线性分析结果,中间需要须经过本构、构件和结构3个层次的分析。经过多年的发展,3个层次上均已形成对应的数值分析方法体系,其中某些方面仍是国际、国内的研究热点。

1967年,McNeice<sup>[35]</sup>进行了4个角点竖向支撑

的双向钢筋混凝土板在中点集中荷载作用下的静力实验,后来此实验结果成为研究和验证钢筋混凝土双向板性能的 benchmark 结果。举例如图 7 所示,板厚 44.5 mm,钢筋布置于 75% 的板厚度处,每个方向的体积配筋率为  $8.5 \times 10^{-3}$ 。本例非线性有限元分析中采用的是  $3 \times 3$  个二次减缩积分分层壳单元,厚度方向采用 9 个积分点以获取比较光滑的应力分布。此外,为了避免非线性求解过程中可能出现的不稳定现象,迭代过程采用了弧长法。由图 8 所示的挠度-荷载曲线对比可以看出,计算结果与实验结果基本吻合。

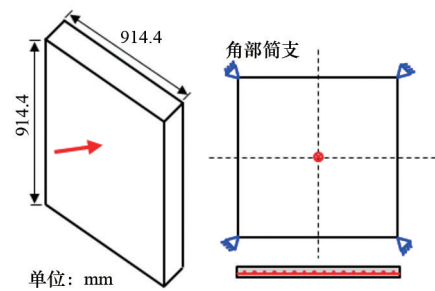


图7 钢筋混凝土双向板

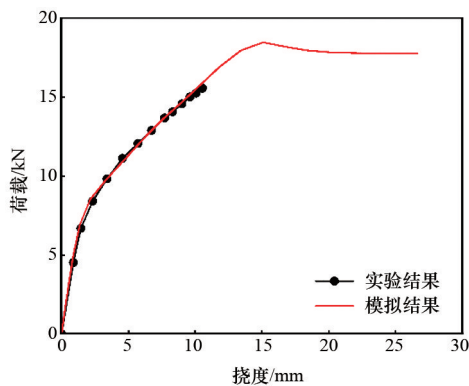


图8 板中心荷载-位移曲线

2004年, Thomsen等<sup>[36]</sup>进行了单片平板剪力墙在顶部水平荷载作用下的反复加载实验,如图9所示,剪力墙的高度为3658 mm,宽度为1219 mm。实验中,剪力墙受到轴压比0.07的轴力作用,并根据预定的位移加载路径对剪力墙顶端框架梁施加低周反复水平荷载。有限元采用分层壳模拟,钢筋以面积等效为钢筋层,采用4节点减缩积分壳单元。考虑到实际材料性质具有随机分布的特点,计

算过程中材料的弹性模量、抗压强度与抗拉强度采用随机谐和函数法生成二维随机场,如图10所示。100个样本点的滞回曲线模拟结果与实验实测结果的对比,如图11所示。

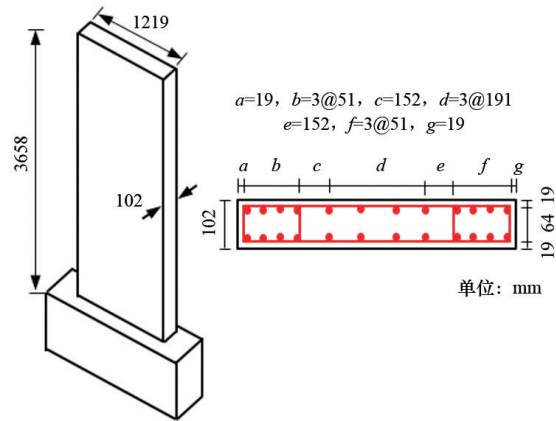


图9 剪力墙结构设计细节

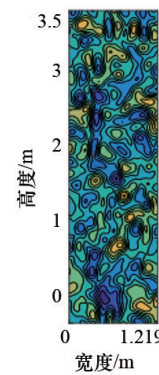


图10 随机场样本

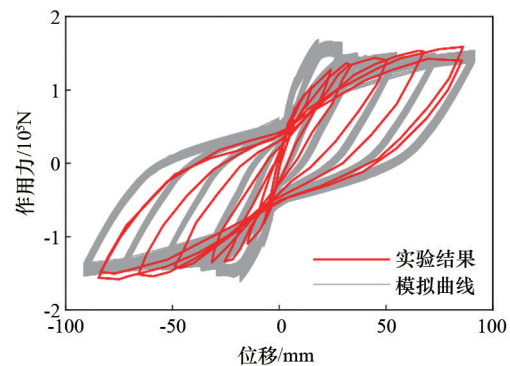


图11 模拟所得滞回曲线

近年来,中国规划、设计和建设了很多超高层结构。对于高度超过500 m的超高层结构,其结构形式有了新的发展,在核心筒作为主要抗侧力结构的基础上,在外侧设置若干巨型柱子作为抗侧力构

件,再采用桁架将核心筒与巨型柱联系在一起,组成巨柱-核心筒结构。此类结构的巨型柱截面往往非常大,如上海中心单根巨型柱截面达到了 $20\text{ m}^2$ 以上(图12)。巨型柱一般采用型钢-钢筋混凝土复合结构截面,其抗侧刚度和承载力均较大。巨型柱的结构性能是否能够达到设计预期,是制定结构方案时遇到的核心问题之一。同时,由于巨型柱截面太大,无法进行实验研究,数值模拟手段就成了研究其结构性能的必要手段。基于损伤模型对上海中心巨型柱设计方案进行的数值模拟研究,结果如图13所示,模型能够模拟巨型柱的混凝土开裂、钢筋受力和型钢屈服等非线性行为,所得结果对设计方案的完善具有参考性。



图12 上海中心巨型柱

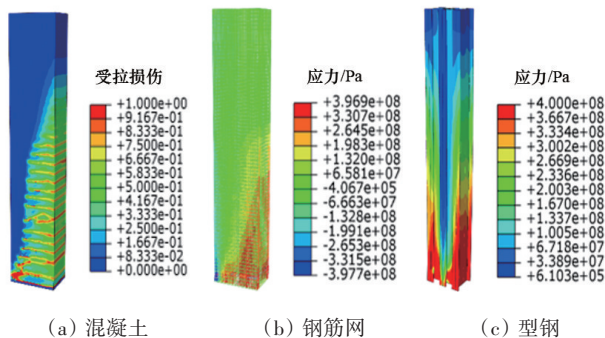


图13 巨型柱模拟结果

基于损伤模型,对一栋框架剪力墙结构进行了大震作用下的倒塌模拟。此工程是一座甲级写字楼为主的综合大型高层建筑,工程地址位于上海浦东新区某地,其建筑功能主要包括商业、酒店、娱乐、会议中心等。建筑高度 $90\text{ m}$ ,共23层,建筑面积约 $32880\text{ m}^2$ 。根据中国和上海地方现行规范进行结构设计,结构采用框架剪力墙结构,设计使用年限为50年,按七度抗震设防,场地类别为二类。建筑结构沿竖向分为2个区,1~6层为一区,7~23层为二区。分别在4个角点电梯井处设置剪力墙,

中间采用框架结构连接剪力墙,一区剪力墙厚度为 $0.5\text{ m}$ ,混凝土强度等级为C45,二区剪力墙厚度为 $0.4\text{ m}$ ,混凝土强度等级为C40。数值模拟中,梁、柱采用基于位移插值的纤维梁单元,剪力墙采用分层壳单元,钢筋分别以rebar和rebar layer的形式植入到混凝土单元中。底部一致输入地震加速度时程如图14所示,地震动持时 $20\text{ s}$ ,峰值加速度 $g=10\text{ m/s}^2$ 。数值模拟结果显示,结构在承受地震作用之后约 $10\text{ s}$ 发生整体倒塌,其平面不规则处由于变形和应力的集中成为最先发生倒塌的部位,如图15所示,这与结构设计与分析的经验是一致的。

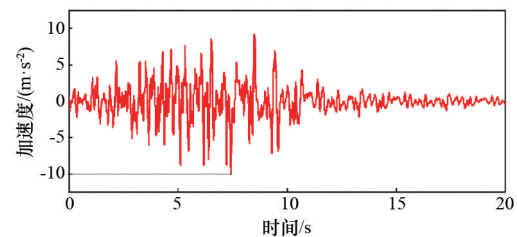


图14 地震加速度时程

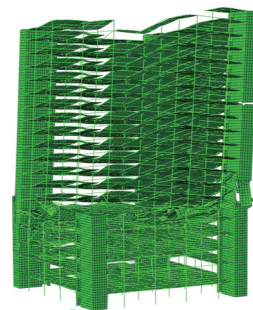


图15 模拟结构倒塌

损伤力学理论与现代计算方法的结合,不但能够应用于土木工程领域,还能在其他领域有所应用,并取得意想不到的效果。由此可见,土木结构分析也可以为其他领域的研究提供一定的借鉴,此处以一例说明。人骨具有复杂的细观结构,外部的皮质骨致密因而刚度、强度较大,内部的松质骨为多孔结构,有着复杂走向的骨小梁,骨小梁在应力的作用下,形成自然优化的多孔结构,有效传递应力。自20世纪70年代开始,生物力学的先驱们就开展了基于有限单元法的人骨力学性能研究<sup>[37-41]</sup>。实际上,早期研究由于受到计算能力的制约,所建立的有限元模型并不包含骨小梁等松质骨细观结



构,所得模拟结果尚不够精细。直到上世纪90年代,数字图像处理设备和技术获得了长足的发展,计算机的计算和信息处理能力也不断提升。数字图像处理技术与有限单元法有着相近的理论基础和技术手段,二者的结合即形成了目前为大家所熟知的数字医学有限元分析技术<sup>[42-46]</sup>。由于人骨几何形状复杂,内部结构更加复杂,很难在几何模型上划分有限元网格,所以任晓丹等<sup>[47-48]</sup>研究中采用了无网格方法,基于micro-CT点元数据进行了数值分析建模,引入损伤模型模拟人骨的损伤和破坏,得到了如图16所示的模拟结果。由图16可以看出,分析模型能够准确反映人骨内部的应力传递路径,且符合人骨小梁结构的自然优化走向规律,人骨的整体破坏过程也得到了精细的反映。该研究结果对于定量评估人骨的力学性能,为临床决策提供定量依据,奠定了良好的基础。

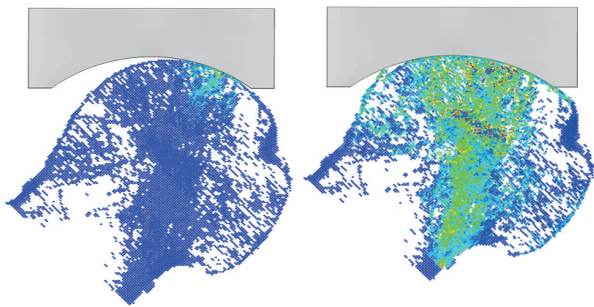


图16 股骨头受力分析结果切片展示

## 4 结论

损伤力学作为一门学科,是力学基础理论与工程实践结合的产物。损伤力学的核心科学问题是固体材料的破坏问题,这一问题是钱学森先生所提及的力学的两个基本难题之一(另一个基本难题是湍流问题)。另一方面,损伤力学并没有只停留在理论探索层面,而是在发展的过程中积极对接工程需求,形成了理论与实践良性互动的格局。对于一些理论上难以解决而实践上又迫切需要的问题,比如多裂纹相互作用问题,损伤力学采用唯象的方式加以反映,力求先满足工程需求,再为理论的发展留下足够的空间。对于不同的工程门类所遇到的

共性问题,比如材料率敏感性问题,采用通用的理论工具对现有损伤力学理论框架进行扩展,形成新型的具有通用性的理论分支,并应用于不同分支的工程问题之中。此外,损伤力学和损伤演化问题具有连续性,可以与有限单元法、无网格法等基于连续介质理论框架建立起来的数值方法无缝对接,这就使得其应用非常简单,只需开发损伤模型所对应的本构关系模块,而不必再修改其他模块的代码,这也是损伤力学能够取得广泛工程应用的原因之一。已有的损伤力学理论已经构成了一个完整的框架,与数值模拟方法结合之后已经成为结构破坏分析的通用工具之一。随着理论和实践的不断展,在多尺度损伤和多物理场损伤方面的发展构成了损伤理论未来的发展方向。

## 参考文献(References)

- [1] Kachanov L M. Time of the rupture process under creep conditions[J]. Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, 1958, 8: 26-31.
- [2] Rabotnov Y N, Leckie F A, Prager W. Creep problems in structural members[J]. Journal of Applied Mechanics-ASME, 1970, 37(1): 249-265.
- [3] Lemaitre J. Evaluation of dissipation and damage in metals submitted to dynamic loading[C]// Proceedings of ICAM-1. New York, USA: Elsevier, 1971: 540-549.
- [4] Lemaitre J, Chaboche J L. Phenomenological approach of damage rupture[J]. Journal de Mecanique Appliquee, 1978, 2(3): 317-365.
- [5] Dougill J W. On stable progressively fracturing solids[J]. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP, 1976, 27(4): 423-437.
- [6] Ladeveze P. On an anisotropic damage theory (in French) [D]. Cachan, France: laboratoire de Mecanique et Technologie, 1983.
- [7] Mazars J. A description of micro- and macroscale damage of concrete structures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 25(5-6): 729-737.
- [8] Simo J C, Ju J W. Strain-based and stress-based continuum damage models—I. Formulation[J]. Mathematical & Computer Modelling, 1987, 12(3): 378-378.
- [9] Simo J C, Ju J W. Strain-based and stress-based continuum damage models—II. Computational aspects[J]. Mathe-

- matial & Computer Modelling, 1989, 12(3): 378-378.
- [10] Ju J W. On energy-based coupled elastoplastic damage theories: Constitutive modeling and computational aspects[J]. International Journal of Solids & Structures, 1989, 25(7): 803-833.
- [11] Ju J W. Isotropic and anisotropic damage variables in continuum damage mechanics[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1990, 116(12): 2764-2770.
- [12] Cervera M, Oliver J, Faria R. Seismic evaluation of concrete dams via continuum damage models[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1995, 24(9): 1225-1245.
- [13] Faria R, Oliver J, Cervera M. A strain-based plastic viscous-damage model for massive concrete structures[J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(14): 1533-1558.
- [14] 李杰, 吴建营. 混凝土弹塑性损伤本构模型研究 I: 基本公式[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9): 14-20.
- [15] Wu J Y, Li J. A unified plastic-damage model for concrete and its applications[J]. Advances in Structural Engineering: Theory and Applications, 2006(2): 313-319.
- [16] Wu J Y, Li J, Faria R. An energy release rate-based plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids & Structures, 2006, 43(3): 583-612.
- [17] Wu J Y, Li J. Unified plastic-damage model for concrete and its applications to dynamic nonlinear analysis of structures[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2007, 25(5): 519-540.
- [18] 曹杨, 李杰. 双连梁短肢剪力墙结构的随机损伤演化分析[J]. 力学季刊, 2008, 29(1): 102-112.
- [19] 李杰, 李奎明. 钢筋混凝土短肢剪力墙结构非线性分析研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 23-30.
- [20] 任晓丹, 李杰. 混凝土损伤与塑性变形计算[J]. 建筑结构, 2015, 45(2): 29-31, 74.
- [21] Li J, Ren X D. Stochastic damage model for concrete based on energy equivalent strain[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(11-12): 2407-2419.
- [22] 张其云. 混凝土随机损伤本构关系研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2001.
- [23] Kandarpa S, Kirkner D J, Spencer B F. Stochastic damage model for brittle materials subjected to monotonic loading[J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 1996, 122(8): 788-795.
- [24] 李杰, 杨卫忠. 混凝土弹塑性随机损伤本构关系研究[J]. 土木工程学报, 2009(2): 31-38.
- [25] Ren X D, Yue Q X. Reliability assessment of reinforced concrete structures based on random damage model[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2018, 14(6): 780-790.
- [26] Cervera M, Oliver J, Manzoli O. A rate-dependent isotropic damage model for the seismic analysis of concrete dams[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1996, 25(9): 987-1010.
- [27] Ren X D, Li J. A unified dynamic model for concrete considering viscoplasticity and rate-dependent damage [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2013, 22(4): 530-555.
- [28] 李杰, 任晓丹, 杨卫忠. 混凝土二维本构关系试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(4): 6-12.
- [29] Karsan I D, Jirsa J O. Behavior of concrete under compressive loadings[J]. Journal of the Structural Division, 1969, 95(12): 2543-2563.
- [30] Malvar L J, Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(6): 735-739.
- [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] Sparks P R, Menzies J B. The effect of the rate of the loading upon the static fatigue strength of plain concrete in compression[J]. Magazine of Concrete Research, 1973, 25(83): 73-80.
- [33] 董毓利, 谢和平, 赵鹏. 不同应变率下混凝土受压全过程的实验研究及其本构模型[J]. 水利学报, 1997(7): 72-77.
- [34] Popp C. Untersuchungen fiber das verhalten von beton bei schlagartiger beanspruchung[R]. Stuttgart, Germany: Deutsche Ausschuss fur Stahlbeton, 1977.
- [35] McNeice G M. Elastic-plastic bending analysis of plates and slabs by the finite element method[D]. London: Department of Civil and Engineering, University of London, 1967.
- [36] Thomsen J H, Wallace J W. Displacement-based design of slender reinforced concrete structural walls-experimental verification[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(4): 618-630.
- [37] Belytschko T B, Andriacchi T P, Schultz A B, et al. Analog studies of forces in the human spine: Computational techniques[J]. Journal of Biomechanics, 1973, 6(4): 361-371.

- [38] Andriacchi T P, Schultz A B, Belytschko T B, et al. A model for studies of mechanical interactions between the human spine and rib cage[J]. *Journal of Biomechanics*, 1974, 7(6): 497-507.
- [39] Belytschko T B, Kulak R F, Schultz AB, et al., Finite element stress analysis of an intervertebral disc[J]. *Journal of Biomechanics*, 1974, 7(3): 277-285.
- [40] Huijskes R, Chao E Y. A survey of finite element analysis in orthopedic biomechanics: The first decade[J]. *Journal of Biomechanics*, 1983, 16(6): 385-409.
- [41] Hollister S J, Brennan J M, Kikuchi N. A homogenization sampling procedure for calculating trabecular bone effective stiffness and tissue level stress[J]. *Journal of Biomechanics*, 1994, 27(4): 433-444.
- [42] Müller R, Rügsegger P. Three-dimensional finite element modelling of non-invasively assessed trabecular bone structures[J]. *Medical Engineering and Physics*, 1995, 17(2): 126-133.
- [43] Ulrich D, Rietbergen B, Weinans H, et al. Finite element analysis of trabecular bone structure: A comparison of image-based meshing techniques[J]. *Journal of Biomechanics*, 1998, 31(12): 1187-1192.
- [44] Buie H R, Campbell G M, Klinck R J, et al. Automatic segmentation of cortical and trabecular compartments based on a dual threshold technique for in vivo micro-CT bone analysis[J]. *Bone*, 2007, 41(4): 505-515.
- [45] Verhulp E, Rietbergen B, Müller R, et al. Indirect determination of trabecular bone effective tissue failure properties using micro-finite element simulations[J]. *Journal of Biomechanics*, 2008, 41(7): 1479-1485.
- [46] Chen Y, Pani M, Taddei F, et al. Large-scale finite element analysis of human cancellous bone tissue micro computer tomography data: A convergence study[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2014, 136(10): 1013-1020.
- [47] Kulper S A, Fang C X, Ren X D, et al. Development and initial validation of a novel smoothed-particle hydrodynamics-based simulation model of trabecular bone penetration by metallic implants[J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 2018, 36(4): 1114-1123.
- [48] Kulper S A, Fang C X, Ren X D, et al. A novel fracture mechanics model explaining the axial penetration of bone-like porous, compressible solids by various orthopaedic implant tips[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 80: 128-135.

## Damage mechanics as applied to civil engineering

REN Xiaodan

School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

**Abstract** In the past 30 years, significant progress has been made in the field of civil engineering and infrastructure construction in China, greatly supporting the continuous development of the economy. While China's economy steps into the "new normal" phase, the development of civil engineering shows some new features and the developments of fundamental theories and advanced technologies attract more and more attention. Nonlinear analysis of structures, one of the essential problems in civil engineering, has been concerned by more and more researchers and engineers. For constitutive modeling of engineering materials, the damage model plays an important role where structural damage and failure are considered. In this paper, the historical development of damage model for quasi-brittle materials is briefly reviewed. Then V&V of the damage model is described and its applications to civil engineering are presented by case studies. Finally, an application of the theory to bio-engineering is shown with a case. In the near future, the transformation and upgrading of traditional civil engineering will be promoted by the coupling between its fundamental research and engineering application.

**Keywords** damage model; nonlinear simulation; civil engineering ●



(责任编辑 韩星明)