

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.03.007

基于开裂区平均化方法的混凝土开裂特性

李 强^{1,2},任青文²

(1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司水电工程设计院,湖南 长沙 410014;

2. 河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098)

摘要: 为研究混凝土试件的开裂特性,基于细观力学理论对传统平均化方法进行了改进,提出了开裂区平均化方法。利用不同的平均化方法对级配与粒径分布相同的不同尺寸试件进行计算分析,研究混凝土试件的开裂特性和开裂尺寸依赖性的产生机理。结果表明,开裂区平均化方法能够得到具有尺寸一致性的、表征试件开裂破坏全过程的开裂特性曲线,可确定重要开裂计算参数;开裂尺寸依赖性的出现是由于在试件尺寸变化时,试件中占较小空间的局部开裂区大小及其力学特性基本不受尺寸变化影响,而占较大空间的线弹性区大小及其力学性能却受尺寸变化影响较大,导致整体宏观响应受尺寸变化较大,并由此产生尺寸依赖性。

关键词: 混凝土;开裂特性;尺寸依赖性;标准平均化方法;开裂区平均化方法

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2016)03-0226-07

Concrete cracking characteristic analysis using cracking zone average method

LI Qiang^{1,2}, REN Qingwen²

(1. Hydropower Engineering Department, PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China;

2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate concrete cracking characteristics, the traditional average method was modified based on meso-mechanics theory and used in cracking zones. Using different average methods, concrete specimens with different sizes but the same grading and size distributions were analyzed, and cracking characteristics and mechanisms of cracking size dependency were studied. The results show that cracking stress-strain curves obtained with the cracking zone average method are size independent, and they can represent the entire cracking process and determine important cracking parameters. It is also shown that when the specimen size varies, the area and mechanical characteristics of local nonlinear cracking zones are barely affected by the specimens size change, while the area and mechanical characteristics of linear elastic zones are highly affected by the specimens size change, making the global average mechanical characteristics change a lot, thus the cracking size dependency occurs.

Key words: concrete; cracking characteristic; size dependency; standard average method; cracking zone average method

混凝土结构的破坏分析表明,结构的破坏通常始于局部的材料强度破坏——开裂,并且裂纹易对结构整体承载性能产生不利影响,甚至导致结构失效^[1-3]。为研究混凝土的开裂破坏机理和扩展机制,目前已经提出了不少的分析模型和方法,应用比较广泛的主要有内聚力裂纹模型^[4-5]、弥散裂纹模型^[6-9]、非局部模型^[10-11]和微平面模型^[12]等,并提出了诸如多轴强度准则^[13]、双K准则^[14-16]等破坏分析准则。不过由于这些模型、方法和破坏准则均将混凝土视为均质材料,没有考虑材料非均质性,对试件开裂破坏中的一些现象,如开裂尺寸依赖

收稿日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(11132003)

作者简介: 李强(1986—),男,湖北宜昌人,博士,从事水工混凝土结构的设计与安全分析研究。E-mail: liqiang_msdi@163.com

通信作者: 任青文,教授。E-mail: renqw@hhu.edu.cn

性^[17-19],难以就其机理进行研究和揭示。细观力学能够在分析中考虑材料细观组成结构对材料的力学特性和力学机理的影响,已有研究也指出,对于混凝土力学特性的研究,如开裂尺寸依赖性,需要从考虑材料组成结构的角度进行研究^[17, 20]。Wriggers 等^[21]、杜成斌等^[22-23]和 Unger 等^[24]从非均质角度,利用细观力学方法对混凝土的力学特性进行了分析,探讨界面厚度、材料非均质性对混凝土试件力学特性的影响,由此得到了一些有益的结论,并在混凝土的破坏过程^[25, 26]和破坏特性^[27-29]等相关研究中得到了广泛的应用。

针对混凝土的开裂尺寸依赖性问题,本文基于细观力学方法和骨料生成投放程序 2D-RAS^[22]生成细观尺度下的混凝土随机骨料模型,并利用不同的平均化方法对试件开裂特性进行研究,分析开裂尺寸依赖性的产生机理,为混凝土开裂多尺度的研究打下基础。

1 混凝土细观研究的平均化方法

1.1 标准平均化方法

平均化方法是细观力学中研究材料宏观力学参数和力学性能的主要方法,它主要研究材料力学性能上的宏细观联系。对代表单元体进行加载,将得到的细观力学响应进行区域平均得到材料的宏观响应,进而可以开展材料宏细观力学特性研究。对于细观代表单元体一般需要满足下面 2 个条件:(a)代表单元体的尺寸相对细观尺度的材料组分和细观结构要足够大,而相对于宏观尺度的结构要足够小,即代表单元体应有尺度连接性和宏观代表性;(b)对于不同尺寸的代表单元体,其平均化后的宏观响应不会随试件尺寸变化而变化,即代表单元体应有尺寸一致性。

为区别于笔者提出的开裂区平均化方法,本文将传统的平均化方法称为标准平均化方法。假定代表单元体的总体积或面积大小为 $|\Omega|$,它在荷载下的某细观响应为 $f(x)$,令其平均化后的宏观响应为 $\langle F \rangle$,则标准平均化公式为

$$\langle F \rangle = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} f(x) d\Omega = \left(\sum_{i=1}^n f(x) |\Omega|_i \right) / |\Omega| \quad (1)$$

式中: n ——单元体试件中的积分点总数; $f(x)$ ——单元体试件某响应的积分点值; $\langle F \rangle$ ——单元体试件某响应的整体平均; $|\Omega|_i$ ——第 i 个积分点的控制区域大小; $|\Omega|$ ——单元体试件的总区域大小,有 $|\Omega| = \sum_{i=1}^n |\Omega|_i$ 。

式(1)显示,平均化的实质是对细观响应进行加权平均,权重因子为对应积分点的控制区大小。从式(1)可以看出,在采用标准平均化时,若试件处于线弹性阶段,响应整体较为均匀,那么在不同试件尺寸时,标准平均化能得到比较好的结果,宏观响应将较为一致;若处于非线性阶段,响应的局部变化较大,这一局部波动会在整体平均中掩盖而无法体现,线弹性区域会随试件尺寸变化,因此不同尺寸间宏观响应有可能出现不一致,进而呈现尺寸依赖性。为研究混凝土开裂尺寸依赖性,并探讨其产生机理,参考复合材料研究中^[29]对局部问题专门分析的思路,对标准平均化方法进行改进,提出开裂区平均化方法。

1.2 开裂区平均化方法

为方便对局部开裂特性进行研究,本文做以下等效:对试件以位移 U 加载,当试件开裂后,将开裂区等效为一条垂直于加载方向的等效裂纹带,如图1所示。通过这一等效建立尺度连接性,该裂纹带在宏观尺度上就是宏观裂纹。开裂区平均化表达式如下:

$$\langle F \rangle_{cr} = \frac{1}{|\Omega|_{cr}} \int_{\Omega_{cr}} f(x) d\Omega_{cr} = \left(\sum_{j=1}^m f(x) |\Omega|_{cr,j} \right) / |\Omega|_{cr} \quad (2)$$

式中: m ——开裂单元积分点总数,有 $m \leq n$; $\langle F \rangle_{cr}$ ——试件等效开裂区内的响应局部平均; $|\Omega|_{cr,j}$ ——单元体试件中发生开裂的积分点 j 的控制区域大小; $|\Omega|_{cr}$ ——单元体试件中发生开裂的总区域大小, $|\Omega|_{cr} = \sum_{j=1}^m |\Omega|_{cr,j}$ 。

需要说明的是,开裂区是试件整体的一部分,因此从物理尺度上讲,标准平均化是试件整体的,开裂区平均化是试件开裂区的。但考虑到代表单元体试件的尺度连接性和代表性,以及开裂的局部特性,两种方法所得到的结果,是宏观尺度下同一位置不同阶段的:标准平均化为线弹性阶段,开裂区平均化为非

线性阶段。

2 计算模型与平均化结果比较

2.1 计算模型

利用杜成斌等^[22]开发的 2D-RAS 骨料生成和投放程序,形成了图 1 所示的 4 个相同投放率、不同尺寸的试件。该组试件的骨料粒径范围为 5~80 mm,级配为三级配,骨料形状为任意多边形。利用图 2 的混凝土细观骨料模型,建立了图 3 所示的有限元模型。为模拟混凝土细观结构中的界面,在骨料和砂浆之间布置了界面层。研究表明,界面层厚度并不均一,约在 50~250 nm 范围内变化,但厚度的变化对试件整体力学性能的影响并不大^[23]。考虑本文主要研究试件开裂特性和尺寸依赖性,为便于建模与计算,假定 4 个试件中的界面层厚度均为 0.2 mm,且不考虑实际中可能存在的孔洞及微裂纹等情况,将之视为理想完好界面。随尺寸增大,4 个模型的节点数依次为 10 807、27 567、29 170、41 599,单元数依次为 10 672、27 466、29 069、41 498。

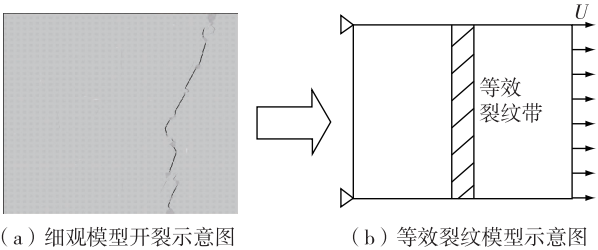


图 1 开裂区裂纹模型等效示意图
Fig. 1 Sketch of equivalent cracking band model

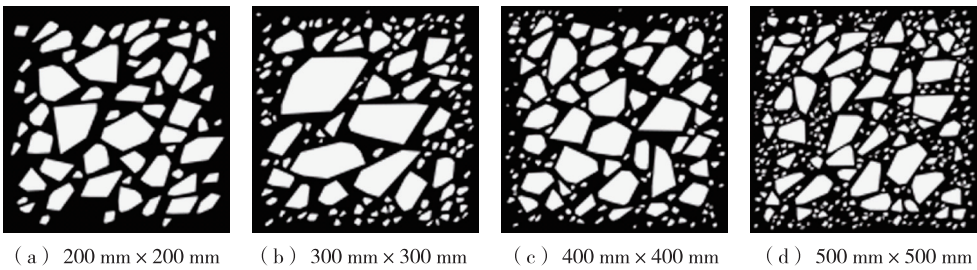


图 2 混凝土细观骨料模型
Fig. 2 Concrete mesoscopic aggregate models

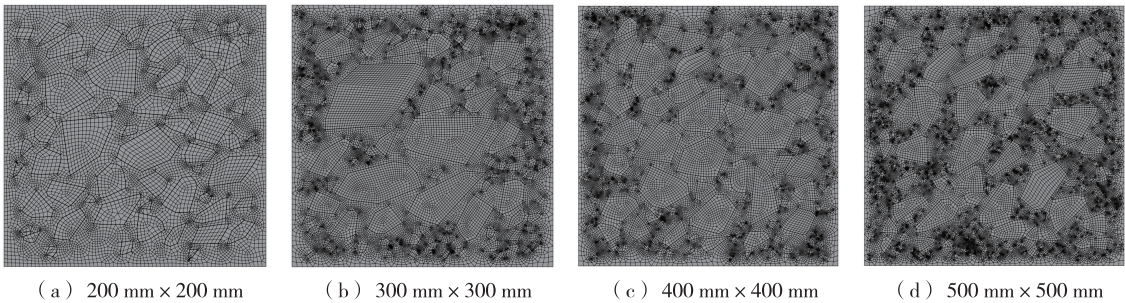


图 3 4 种尺寸的混凝土细观试件有限元模型
Fig. 3 Mesh of concrete mesoscopic models with four different sizes

模型中各组分的参数如表 1 所示^[30]。Evans 等^[31]、Jiang 等^[7]的研究表明,混凝土的开裂始于微裂纹,且基本呈 I 型开裂的形式,所以笔者将针对 I 型开裂进行研究。试件的边界条件如图 4 所示。在材料的本构关系上,由于砂浆及界面具有一定的软化特性,因此其材料本构模型采用塑性损伤本构模型^[32],而骨料一般具有一定的脆性,因此采用带有残余强度的弹脆性本构模型^[33]。此外,计算中需要考虑应力峰值点后的应变软化,因此非线性计算方法采用 Crisfield^[34]提出的弧长法对试件进行计算分析。

表 1 细观模型材料参数

Table 1 Material parameters for mesoscopic model

材料组分	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	抗压强度 F_c/MPa	抗拉强度 F_t/MPa
骨料	55.5	0.16	53.7	5.37
砂浆	26.0	0.22	24.7	2.47
界面	25.0	0.16	11.6	1.16

2.2 平均化结果比较

图5为各尺寸试件的开裂破坏示意图。图5显示,试件破坏时均至少出现一条明显的宏观裂纹,裂纹主要沿垂直于加载的方向曲折发展,其发展路径基本相似。为进行定量分析,利用式(1)和式(2)计算得到了图6和图7所示的曲线。

应力应变关系是表征材料力学特性的重要指标。图6为标准平均化下的整体应力应变曲线,可见应力应变曲线呈现强烈的尺寸依赖性:曲线在应力峰值前一致性较好,而在此后则强烈发散,呈现随试件尺寸增大,峰值应力降低、应变减小的规律。这一结果与常规实验中所呈现的尺寸依赖性规律^[17-20]基本一致,表明标准平均化不适用于非线性问题,只适用于线弹性问题。

图7为开裂区平均化下的开裂应力应变曲线,可见当采用开裂区平均化时,各曲线整体上的变化趋势基本一致,峰值应力基本相同,尺寸依赖性消失。图6与图7对比表明,开裂区平均化方法能够得到较为一致的非线性应力应变关系,更适用于局部开裂特性研究的。这表明对于开裂这一局部非线性行为,需要采用针对局部特征的方法进行研究。根据图7中一致的非线性应力应变曲线,可以验证混凝土试件非线性代表单元体的存在性,并确定本算例中的代表单元体最小代尺寸为200 mm,其大小与线弹性代表单元体相同。虽然模型中的最大骨料粒径达到80 mm,但由于骨料颗粒在其他方向尺寸较小,与试件尺寸的关系以及得到的应力应变结果满足单元体的成立条件,因此200 mm的试件可以作为本算例中混凝土试件的代表单元体。对于其他情况的混凝土细观骨料模型,非线性代表单元体的存在性也是可证的,但是尺寸须进行具体分析确定。

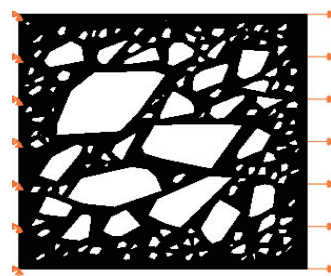


图4 细观试件边界条件示意图(300 mm×300 mm)

Fig. 4 Boundary conditions for mesoscopic models (300 mm×300 mm)

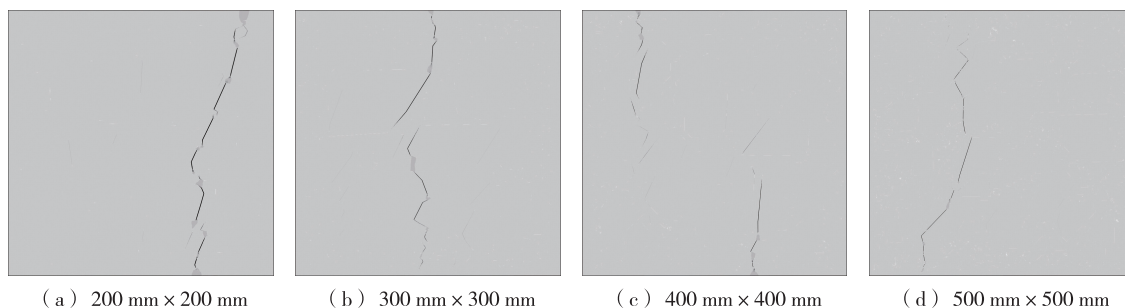


图5 4种不同尺寸的混凝土细观模型的开裂破坏示意图

Fig. 5 Cracking patterns of concrete mesoscopic models with four different sizes

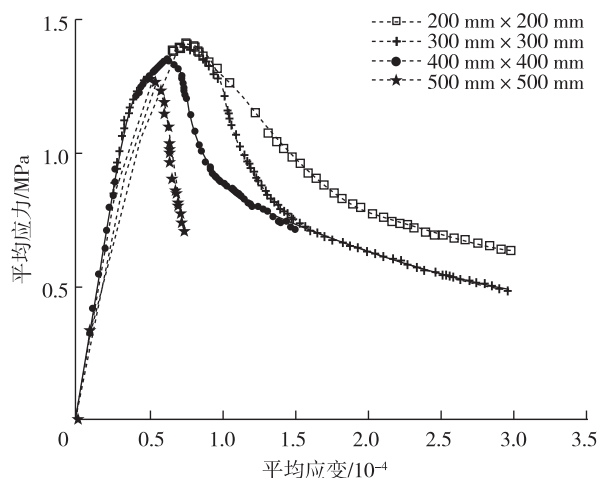


图6 标准平均化的整体应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of specimen obtained with standard average method

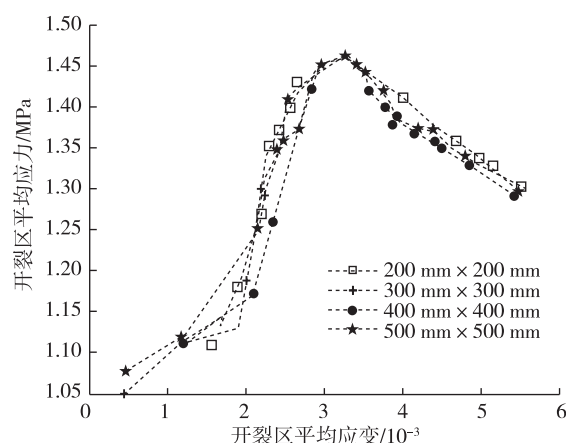


图7 开裂区平均化的开裂应力应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of cracking zone obtained with modified average method

开裂参数是混凝土开裂研究中的重点内容。图6显示,当应力小于1.0 MPa时,各试件的应力应变曲线基本为直线,试件处于线弹性阶段。在该数值以后,试件进入非线性阶段。显然,试件的非线性是由于开裂导致的,图7显示,各试件的起裂应力约为1.10 MPa,由此确定试件的起裂应力。可以发现,该数值与界面参数相近,说明起裂在界面附近,与文献[30,33]的研究结果基本一致。由于图6中所呈现的峰值应力的尺寸依赖性,难以给出可靠的强度参数;而根据图7中的一致性曲线,则可以确定开裂峰值应力和相应应变,以及其他所需要的开裂相关参数。

对比图6与图7,可以发现图7的开裂应变数值比图6中的大了约一个量级。这一差异的出现与方法的局部性有关。试件开裂后,开裂区域的应变较大,而未开裂区则相对较小。由于开裂区平均化只针对局部开裂区,而标准平均化是对整体试件,包括了应变较小的区域,因此在平均时尽管局部开裂区应变数值较大,但线弹性区域较大且权重更大,会使得整体平均结果主要受线弹性区影响,导致其平均化结果偏小,并与开裂区平均化的结果出现量级上的差异。目前在已有试验资料中大多数的应变结果是试件整体的,即对应于标准平均化的结果,其应变数值约为 $200 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$,图6所示的结果约为 300×10^{-6} ,与上述结果基本一致。关于开裂扩展区及开裂区平均化研究,目前的试验资料比较少,因此本文的研究对于未来混凝土开裂扩展特性的研究能够提供一定的参考。此外,根据开裂区平均化的定义,图7中的曲线是由于试件开裂而产生,因此它表征着试件从起裂到裂纹发展直到失效的全过程,可以为试件裂纹区和开裂全过程研究提供参考。

需要说明的是,对于图6与图7,两者曲线斜率的意义略有不同。图6中的曲线是试件整体的应力应变关系,其直线段的斜率能够用来确定材料的弹性模量;图7中的曲线是开裂区应力应变关系,代表的是裂纹面刚度,可以用来进一步确定开裂分析中所需的相关参数,如裂纹面刚度,试件裂纹面的断裂能等。

通过上述分析可知,由于开裂只是在试件的局部薄弱区域发生和发展,虽然该区域的大小及力学特性基本不随试件尺寸的变化而变化,但由于试件中占主导地位的线弹性区域会随尺寸变化发生较大变化。由于试件在尺寸变化时,整体的平均力学响应受线弹性区域影响较大,导致试件的真实开裂特性无法在整体响应中体现,从而使得试件的一些整体力学响应指标呈现较大的尺寸依赖性。因此对于开裂这一典型的局部非线性特性,必须采用专门的局部化方法研究,才能得到能够真实反映试件开裂力学特性的结果。

3 结 论

为研究混凝土试件的开裂力学特性,针对试件的开裂尺寸依赖性问题,笔者提出开裂区平均化方法,研究的主要结论如下:

a. 采用开裂区平均化方法能够得到具有尺寸一致性的开裂应力应变关系,由此确认了混凝土非线性代表单元体的存在,对于不同级配条件的细观骨料模型,非线性代表单元体的尺寸需要根据具体情况进行分析确定。

b. 根据开裂区平均化方法,可以得到表征试件开裂全过程的开裂应力应变曲线。这一结果的获得,可以为混凝土裂纹的萌生发展以及开裂扩展区的分析研究提供参考。此外,通过与标准平均化结果的比对,确定混凝土试件的起裂应力、开裂峰值应力等关键开裂分析参数,为混凝土宏观开裂的进一步分析提供支持与参考。

c. 对混凝土试件开裂尺寸依赖性的产生机制进行了探讨。分析认为,开裂尺寸依赖性的产生,是由于线弹性区域大小在试件中占主导地位,且其随试件尺寸变化较大,导致与试件尺寸无关的局部开裂力学响应无法体现,使得整体宏观响应受其影响而随试件尺寸变化,进而呈现开裂尺寸依赖性。

d. 只研究了简单加载条件下的I型裂纹问题,应力状态简单,便于分析,而未对复杂问题进行探讨。对于复杂应力状态下的问题,本文的研究方法和思路应该是基本适用的,但是对于具体问题需要具体分析。

e. 由于本文主要研究不同尺寸间试件的开裂特性规律及开裂尺寸依赖性的产生机制,因此对于细观模型建立中的一些问题,如界面厚度,材料参数和本构模型进行了一定的假定,也没有考虑水胶比、外加剂等其他物理化学因素的影响。一般而言,这些假定并不改变试件开裂特性的整体规律,但可能会对开裂特性和宏观开裂参数产生影响。对于细观结构模型参数变化对试件整体和局部开裂特性的影响,还有待于进一步深入的研究。

参考文献:

- [1] LI Qiang, REN Qingwen. Research on determining solid structure critical load and failure mode[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 32(C): 113-123.
- [2] REN Qingwen, LI Qiang, LIU Shuang. Research advance in failure risk and local strength failure for high arch dams[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(36): 4672-4682.
- [3] 任青文. 灾变条件下高拱坝整体失效分析的理论与方法[J]. 工程力学, 2013, 30(S2): 85-96. (REN Qingwen. Theory and methods of high arch dam's entire failure under disaster conditions[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(S2): 85-96. (in Chinese))
- [4] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6: 773-782.
- [5] 董玉文, 任青文. 基于 XFEM 的混凝土开裂数值模拟研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(1): 36-40. (DONG Yuwen, REN Qingwen. Study on numerical simulation of crack growth of concrete based on XFEM[J]. Journal of Chongqing Jiao Tong University (Nature Science), 2009, 28(1): 36-40. (in Chinese))
- [6] BAZANT Z P, CEDOLIN L. Finite element modeling of crack band propagation[J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 1983, 109(ST2): 69-82.
- [7] JIANG Yazhou, REN Qingwen, XU Wei, et al. Definition of the general initial water penetration fracture criterion for concrete and its engineering application[J]. Science China-Technological Sciences, 2011, 54(6): 1575-1580.
- [8] ROTS J G, NAUTA P, KUSTERS M A, et al. Smeared crack approach and fracture localization in concrete[J]. Heron, 1985, 30(1): 1-50.
- [9] 龙渝川, 张楚汉, 周元德. 基于弥散与分离裂纹模型的混凝土开裂比较研究[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 80-84. (LONG Yuchuan, ZHANG Chuhan, ZHOU Yuande. A comparative study for concrete fracture analysis using smeared-and discrete-crack model[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 80-84. (in Chinese))
- [10] GILLES P S M, BAZANT Z P. Nonlocal damage theory[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1987, 113: 1512-1533.
- [11] BAZANT Z P, LIN Fengbao. Nonlocal smeared cracking model for concrete fracture[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1988, 114: 2493-2511.
- [12] CANER F C, BAZANT Z P. Microplane model M7 for plain concrete. I: Formulation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(12): 1714-1723.
- [13] 董毓利. 混凝土非线性力学基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [14] 徐世烺, 赵国藩. 混凝土结构裂缝扩展的双 K 断裂准则[J]. 土木工程学报, 1992, 25(2): 32-38. (XU Shilang, ZHAO Guopan. A double-K fracture criterion for the crack propagation in concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal, 1992, 25(2): 32-38. (in Chinese))
- [15] 吴智敏, 徐世烺, 王金来, 等. 三点弯曲梁法研究双 K 断裂参数及其尺寸效应[J]. 水力发电学报, 2000, 24(4): 16-24. (WU Zhimin, XU Shilang, WANG Jinlai, et al. Double-K fracture parameter of concrete and its size effect by using three-point bending beam method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000, 24(4): 16-24. (in Chinese))
- [16] 徐世烺. 混凝土双 K 断裂参数计算理论及规范化测试方法[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2002, 24(1): 1-8. (XU Shilang. The calculation approaches of double-K fracture parameters of concrete: a possible coding standard test method for determining them[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2002, 24(1): 1-8. (in Chinese))
- [17] BAZANT Z P. Concrete fracture models: testing and practice[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69: 165-205.
- [18] MURALIDHARA S, PRASAD B K R, SINGH R K. Size independent fracture energy from fracture energy release rate in plain concrete beams[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 98: 284-295.
- [19] JIN Caifeng, HE Qichang, SHAO Jianfu. An energy-based analysis for aggregate size effect on mechanical strength of cement-based materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 102: 207-217.
- [20] BAZANT Z P, CHEN Erping. Scaling of structural failure[J]. Applied Mechanics Reviews, 1997, 50(10): 593-627.
- [21] WRIGGERS P, MOFTAH S O. Mesoscale models for concrete: homogenisation and damage behaviour[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42(7): 623-636.
- [22] 杜成斌, 孙立国. 任意形状混凝土骨料的数值模拟及其应用[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 662-673. (DU Chengbin, SUN Ligu. Numerical simulation of concrete aggregates with arbitrary shapes and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(6): 662-673. (in Chinese))

- [23] 应宗权,杜成斌,刘冰. 混凝土梁弯拉断裂过程的细观分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007,37(2): 213-216. (YING Zongquan, DU Chengbin, LIU Bing. Meso-scope analysis of fracture process of concrete beam under bending[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007,37(2): 213-216. (in Chinese))
- [24] UNGER J F, ECKARDT S, KONKE C. A mesoscale model for concrete to simulate mechanical failure[J]. Computers and Concrete, 2011, 8(4): 401-423.
- [25] LLOBERAS-VALLS O, RIXEN D J, SIMONE A, et al. On micro-to-macro connections in domain decomposition multiscale methods[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 225: 177-196.
- [26] 田威,党发宁,陈厚群. 基于单轴压缩 CT 技术的混凝土细观破损分区研究[J]. 水利学报, 2011,42(8): 995-1001. (TIAN Wei, DANG Faning, CHEN Houqun. Experimental study on meso damage-fracture divisinal zones of concrete under uniaxial compressing using CT technique[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(8): 995-1001. (in Chinese))
- [27] CABALLERO A, LOPEZ C M, CAROL I. 3D meso-structural analysis of concrete specimens under uniaxial tension[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(52): 7182-7195.
- [28] BELYTSCHKO T, SONG J H. Coarse-graining of multiscale crack propagation[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 81(5): 537-563.
- [29] NGUYEN V P, LLOBERAS-VALLS O, STROEVEN M, et al. On the existence of representative volumes for softening quasi-brittle materials;a failure zone averaging scheme[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199(45-48): 3028-3038.
- [30] 秦武,杜成斌,孙立国. 基于数字图像技术的混凝土细观层次力学建模[J]. 水利学报, 2011, 42(4): 431-439. (QIN Wu, DU Chengbin, SUN Ligu. Meso-level analysis model for concrete based on digital image processing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 431-439. (in Chinese))
- [31] EVANS R H, MARATHE M S. Microcracking and stress-strain curves for concrete in tension[J]. Materials and Structures, 1968 (1): 61-64.
- [32] LEE J, FENVES G L. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1998, 27(9): 937-956.
- [33] UNGER J F, ECKARDT S. Multiscale Modeling of Concrete[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2011, 18 (3): 341-393.
- [34] CRISFIELD M A. An arc-length method including line searches and accelerations[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1983,19: 1269-1289.

· 简讯 ·

河海大学获批中国大学生 iCAN 创新创业实践教育基地

2016年4月9日,中国大学生 iCAN 创新创业实践教育基地授牌仪式在北京举行,中国大学生 iCAN 创新创业大赛组委会主席、北京大学张海霞教授,教育部创新方法教学指导委员会副主任、大连理工大学冯林教授出席仪式,并为获得中国大学生 iCAN 创新创业实践教育基地的北京大学、吉林大学、四川大学、山东大学、河海大学等 25 所国内重点高校和行业特色院校授牌。

河海大学 2013 年起在常州校区实施创新创业教育行动计划,通过理论教学、科学研究和创新创业的“三元结合”,构建“讲堂+赛场+工场”的学生创业实践生态链,激发学生的创新思维与创业意识,增强学生的创新创业能力,建立了多层次、立体化的创新创业教育体系,形成了浓郁的创新创业氛围,涌现出众创创新创业典型,形成了广泛的社会影响。

(本刊编辑部供稿)