

# 用改良模型分析缺陷混凝土梁的动强度

覃源<sup>1</sup>, 柴军瑞<sup>1,2</sup>, 党发宁<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048; 2. 三峡大学 土木水电学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 改进了传统的数字混凝土建模方法, 利用新方法建立了存在初始缺陷的混凝土梁三点弯数值试验模型, 随后对所建立的模型进行了3种工况的数值模拟。分析了初始缺陷的存在对混凝土动强度的影响规律, 结果显示: 在加载初期, 加载速率越高, 初始缺陷对材料动强度的影响越明显, 但是在加载后期此影响减弱; 当荷载达到材料的强度点时, 不同的加载速率下, 初始缺陷对混凝土材料动强度影响均不显著。通过与试验结果的对比, 发现改进后的模型计算精度高于传统模型, 计算结果更加合理, 在工程实际当中能够取代传统的数字混凝土模型。

**关键词:** 混凝土; 细观模型; 数值模拟; 初始缺陷; 动强度; 三点弯

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2012)04-0085-06

## Numerical Analysis on the Modified Model to the Dynamic Strength of Defective Concrete Beam

QIN Yuan<sup>1</sup>, CHAI Junrui<sup>1,2</sup>, DANG Fanning<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulic and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P. R. China;  
2. College of Civil & Hydropower Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

**Abstract:** By improving the traditional digital concrete modeling method, the new defective concrete model was established. Three cases were simulated based on this model. The influence of initial defectiveness on the dynamic strength was investigated. The result shows that: 1) At initial stage, the influence of the initial defectiveness on the dynamic strength becomes more obviously with the increasing of the loading speed; 2) Regardless of the same loading speed, the influence becomes less obviously when the load reaches the strength point of the concrete; 3) The simulation result is compared with the test result, and it is deduced that the new model has higher computational accuracy and the result is more rational, and it can take the place of the traditional digital concrete model in practice.

**Key words:** concrete; microscopic model; numerical simulation; initial defect; dynamic strength; three-point-bending

混凝土大多由人工或者机器搅拌而成, 其内部存在天然的初始缺陷(裂缝、孔洞)不可避免。

多年来, 很多学者对混凝土开展了大量的研究, 他们采用的研究方法大致分为2种: 试验方法和数值模拟方法。试验方面, Masahiko等<sup>[1]</sup>利用SIBIE法检测了预应力混凝土模型未灌注均匀区域(即缺陷区域)的分布。为了研究缺陷混凝土梁的开裂规

律, Sagar等<sup>[2]</sup>将声发射技术应用到带有凹槽的三点弯试验中(凹槽可看作外部缺陷)。周继凯等<sup>[3-5]</sup>则采用全数字化声发射系统采集了混凝土试验中, 从加载至最终破坏的声发射特征参数和波形, 从声发射试验方面得到了混凝土试件受力破坏时, 其内部的裂纹的变化规律。丁卫华等<sup>[6-7]</sup>将便携式加载设备与CT技术相结合, 成功获得了混凝土试件内

收稿日期: 2011-10-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(50679073); 国家自然科学基金重点项目(90510017)

作者简介: 覃源(1983-), 男, 博士生, 主要从事混凝土动力学数值模拟及实验研究, (E-mail)lanelyly@163.com。

部初始缺陷的分布状况,以及内部裂纹从萌生到发展的全过程。数值模拟方面,郑丹等<sup>[8]</sup>提出了基于静力本构和细观缺陷的混凝土动力本构模型,较好的反映了缺陷混凝土的动力特性。马怀发等<sup>[9-11]</sup>通过对混凝土的声发射凯塞效应的研究,分析了惯性效应、预静载和水的黏性等因素对混凝土材料的损伤滞后特性的影响。Shi等<sup>[12-13]</sup>通过改变缺陷混凝土梁模型中的外部缺陷的尺寸,并施加连续荷载的方法,分析研究了外部缺陷尺寸对混凝土梁强度的影响。Skarżyński等<sup>[14]</sup>对外部缺陷混凝土梁的破损区域发展过程进行了数值模拟及试验验证。

大部分数值模拟方法偏向于对无缺陷或存在外部缺陷的混凝土试件的研究,而对内部存在的天然初始缺陷研究较少。不少学者通过试验手段真实的描绘出了细观混凝土内部的初始缺陷,但多为定性分析。其次,由于混凝土内部结构随机性强,使试验结果的可重复性低。笔者通过改进传统建模方法,模拟了混凝土内部的天然缺陷,并进行多工况的计算分析。对比试验结果发现改进后模型的计算结果更加贴近试验,可以取代传统的模型。

## 1 模型的建立及参数的选取

### 1.1 模型的建立

建立带有初始缺陷的数字混凝土模型流程图如图1所示,其中每个步骤细节描述如下:

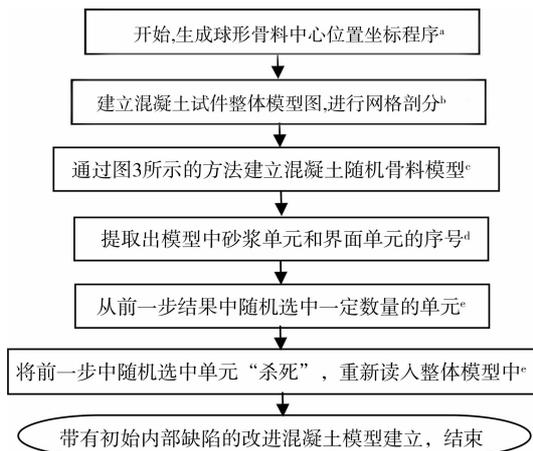
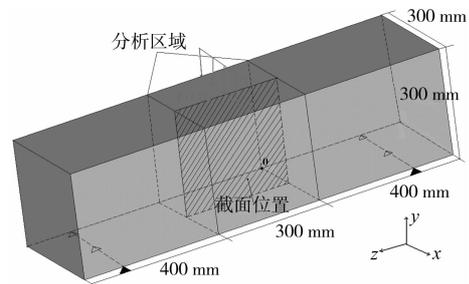


图1 模型建立流程图(流程细节描述见1)~6)所示)

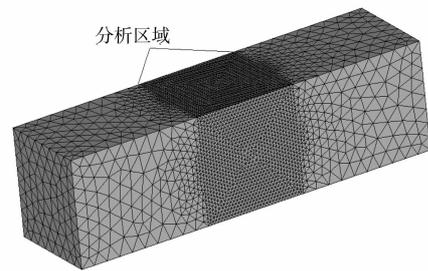
1)运用随机数学方法,通过FORTRAN程序生成球心位置坐标ANSYS命令流,此命令流中的内容可直接被ANSYS调用。

2)在ANSYS软件中建立试件整体模型,几何尺寸如图2(a)。用四面体单元对模型进行剖分(如图2(b)),剖分后整体单元总数为278122个,整体节点总数为48920个,分析区域在图2中指出,此

区域的网格剖分要密于其他区域,单元总数为235630个,占整体单元总数的84.72%,节点数量为42181个,占整体节点总数的86.22%。



(a)几何尺寸、边界条件、截面位置示意图



(b)整体网格剖分图

图2 混凝土梁数值模型

3)将生成的骨料位置坐标命令流读入整体模型中,并对每个四面体单元赋予相应的材料属性,具体方法如图3(a)所示。如果一个单元的每个节点都落在骨料轮廓线以内,那么它将被定义为骨料属性单元;相反如果该单元的每个节点都落在骨料轮廓线以外,它将被定义为砂浆属性单元,除此以外的单元都将被定义为界面属性单元。分析区域截面图如图3(b)所示(截面提取位置为图2(b)中阴影部分,以图中O点为坐标原点,此截面位置坐标为 $X = 150 \text{ mm}$ )。

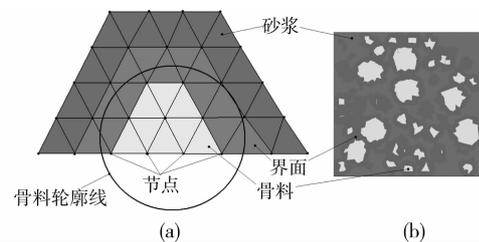


图3 混凝土随机骨料模型建立方法示意图

4)通过软件提取出模型中所有砂浆和界面单元的信息,此步骤是建立带有初始缺陷混凝土模型的关键。

5)假设初始缺陷单元数量占混凝土试件分析区域单元数量的1%,那么需提取出的界面和砂浆单元总数为2356个。再次通过FORTRAN程序进

行编程,在前一步的基础上随机提取出这些单元的序号并储存。

6)“杀死”这个命令来自 ANSYS 命令流语句,其原理是将一个极小的弹性模量赋予指定单元,使得这些单元可以被看作是混凝土材料中的天然孔洞或者微裂纹。“杀死”命令在程序中的具体表达方式为“ekill,*n*”其中“*e*”代表单元,“*n*”为需要被“杀死”的单元序号。通过以上方法,建立了混凝土内部的初始缺陷单元(图4)。

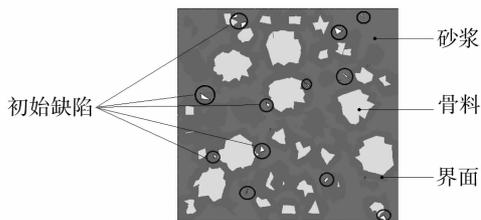


图4 带有初始缺陷的混凝土模型截面图

## 1.2 材料属性及相关计算条件

数值计算和物理试验所用混凝土试件几何尺寸如图2(b)所示,均为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 1\,100\text{ mm}$ 的混凝土梁,梁中部 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 区域为分析区域。采用两端绞支约束,试验材料参数见表1,数值计算材料参数见表2。试验和数值模拟的分析区域相同,在分析区域上部施加均布荷载,加载速率见表3。为了使计算结果具有可比性,对有、无初始缺陷的混凝土数值模型分别进行了3种工况(表3)的数值模拟计算,选择最大拉应变破坏准则作为混凝土试件损伤判断标准,双折线损伤演化

模型为损伤本构模型<sup>[15]</sup>。

表1 试验用三级配混凝土材料参数

设计等级	级配	水灰比	坍落度/cm	砂率/%	容重/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )
C35	3	0.43	6.4	30	2 500

表2 数字混凝土模型参数

	弹性模量/ GPa	泊松比	抗拉强度/ MPa	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
骨料	55	0.20	6.0	2 800
界面	25	0.16	3.5	2 200
砂浆	28	0.16	4.2	2 400

表3 计算工况

工况	模型		加载率/ ( $\text{kN}\cdot\text{s}^{-1}$ )
	有初始缺陷模型	无初始缺陷模型	
C1	✓	✓	3 600
C2	✓	✓	3 000
C3	✓	✓	2 400

## 2 结果及分析

### 2.1 数值模拟结果

对改进后的模型和传统的随机骨料模型进行了3种工况的数值模拟计算。图5和图6即2类模型在加载初期的损伤截面图,其中图5(a)和图6(a)为传统模型(即无初始缺陷模型)计算结果,图5(b)和图6(b)为改进后模型(即有初始缺陷模型)计算结果。

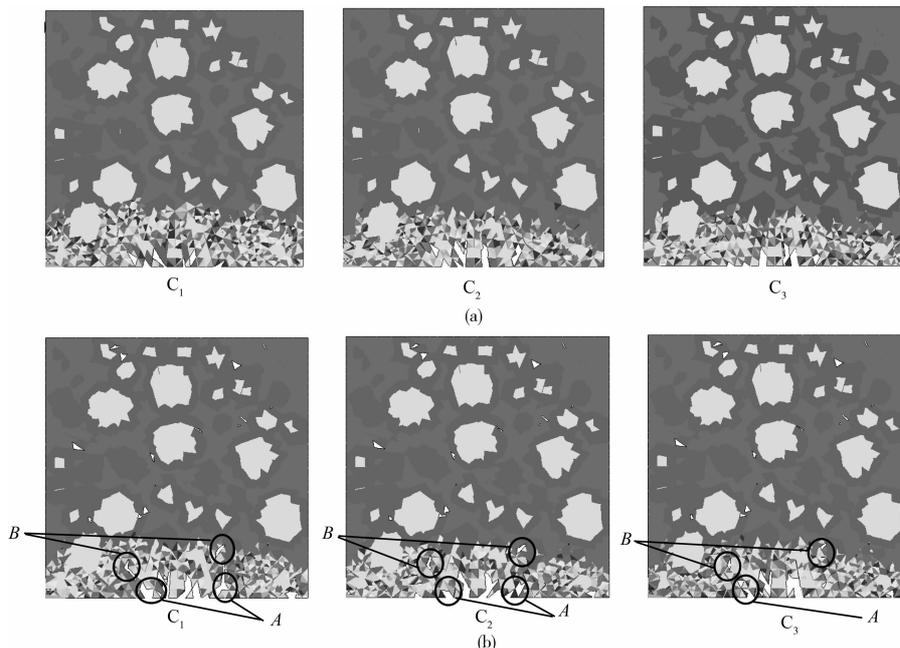


图5 加载初期模型损伤截面图

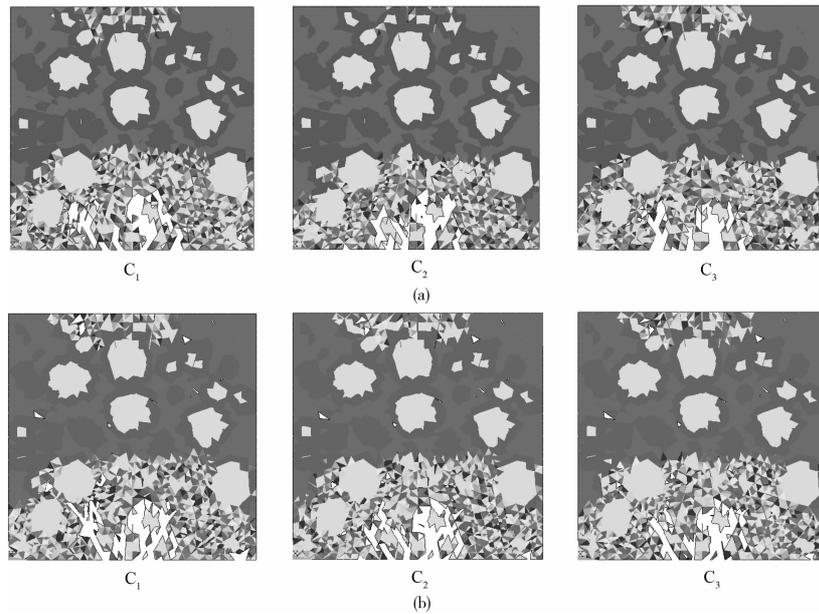


图 6 荷载达到一定数值(强度点)时混凝土模型损伤截面图

从图 5 可以看出,加载初期,不论模型中存在初始缺陷与否,损伤始终最早出现在模型底部中央,有极少的裂纹出现在骨料上。不同的是:1)当混凝土模型中存在初始缺陷时,产生的微裂纹有向初始缺陷所在位置发展的趋势(如图 5(b)中“B”所示)这一现象随着加载速率的提高变得逐渐明显。2)初始缺陷区域面积在加载初期会有明显扩大,部分相邻的初始缺陷有相互连接的现象(如图 5(b)中“A”所示),此现象说明存在初始缺陷混凝土模型的微裂纹产生速度要高于无初始缺陷模型,这一特点在传统模型中是无法体现出来的。

荷载达到一定数值(在 2.2 节中加以说明)时,从图 6(b)中可以看出,模型底部大部分初始缺陷与外荷载作用下产生的微裂纹相互连通,模型中部初始缺陷区域的变化并不显著。通过对比改进后模型和传统模型的计算结果,不难发现初始缺陷的存在不仅会改变混凝土内部损伤区域的发展方向、分布情况,还会使微裂纹数量增加,但是损伤朝向试件中部发展的总体损伤趋势与传统模型相似。

为了量化损伤计算结果,提取出每一荷载步所对应的损伤单元数量,并绘制如图 7 所示的损伤单元数量随荷载步变化的柱状图。可以看出,加载初期(荷载值约小于 4 MPa 左右),各工况下损伤单元数量都较少,有初始缺陷模型所产生的最大损伤单元数为 3 892 个,无初始缺陷模型则为 3 465 个,两者相差 427 个。有初始缺陷模型的损伤单元数量相对无初始缺陷模型提高了 12.32%。随着荷载的增加,当荷载值超过 4 MPa 且继续增加时,各工况损

伤单元数量先后出现突增现象,但是相同加载速率下,2 种模型产生的损伤单元数量仍然相近。加载结束时,有初始缺陷模型损伤单元数量为 26 732 个,无初始缺陷模型的损伤单元数为 25 247 个,相差 1 485 个,相对于无初始缺陷模型来说,有初始缺陷模型的损伤单元数量提高了 5.88%。由此看来,此时由于总体损伤单元数量大幅度提高,初始缺陷对试件整体损伤的影响程度降低。

总体来说,模型的损伤在加载初期受初始缺陷影响较明显,而在荷载值达到一定数值后,由于试件内部大量损伤单元的产生,此影响逐渐削弱。

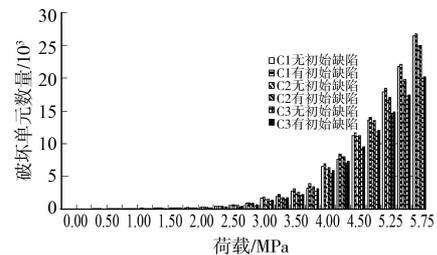


图 7 3 种工况下损伤单元数量柱状图

## 2.2 试验验证

提取出 3 种工况下混凝土试件荷载-位移计算结果,整理得到如图 8 所示的各工况下试件的荷载-位移曲线图(需要说明的是,采用荷载控制法进行加载,荷载随时间的增加而递增,使试件内部损伤单元数量出现累加,当损伤单元总数累加到一定数量时,荷载-位移曲线的斜率会发生突变,产生拐点,定义此拐点为试件的强度点,在荷载超过该强度点之后,

试件进入失稳阶段,此阶段相同荷载步内,试件会产生更多的位移。该方法的优点在于可以根据试件强度点位置,准确描述出进入失稳阶段的具体时间,但此方法无法对卸载阶段进行模拟,因此荷载-位移曲线中无下降趋势)。

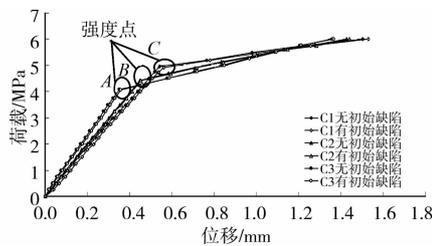


图8 荷载-位移曲线图(A、B、C标记出了强度点的位置)

可以从曲线图中看出:1)无论材料中存在初始缺陷与否,2种模型计算得到的荷载位移曲线规律基本相同,说明改进后的模型是合理的。2)当荷载值还未达到混凝土材料强度点时(即:加载初期),加载速率相同的情况下,存在初始缺陷模型产生位移值总是大于无初始缺陷的模型,说明初始缺陷给模型带来了更大的损伤。3)当荷载值达到并超过材料的强度点时,2类模型的荷载-位移曲线基本重合,

说明此时初始缺陷对试件力学性能的影响程度降低,这一规律与损伤单元数量柱状图所表现出的规律相近。

对2种混凝土模型在达到各自强度点时的计算结果进行统计,并结合试验结果汇总到表4。可以看出:1)在相同计算工况条件下,无初始缺陷的混凝土试件的强度略高于存在初始缺陷的混凝土试件,且加载速率越快,初始缺陷对试件强度影响越显著。2)在加载的任意时刻,相同工况下,存在初始缺陷的混凝土试件产生的位移值总是略大于无初始缺陷的试件,说明初始缺陷的存在会使混凝土试件在相同加载速率下产生更多的损伤。3)对比试验结果可以看出,改进后模型的强度计算结果与试验结果较接近,强度平均计算精度为94.07%,比传统模型的平均计算精度提高了2%。在位移计算结果方面,发现数值模拟结果的精度仍然较低,这一现象与计算时采用的损伤本构模型有关。改进后模型的位移计算结果平均精度为69.81%,比传统模型的计算精度提高了3.4%。从总体来看,改进后混凝土模型的计算结果更加贴近试验结果,试验精度有一定的提高,可以完全取代传统模型,更好的应用于工程实际。

表4 混凝土动强度对比

	物理试验模型		有初始缺陷模型		无初始缺陷模型	
	强度/MPa	位移/mm	强度/MPa	位移/mm	强度/MPa	位移/mm
C1	4.49	0.812	4.79	0.581	4.91	0.532
C2	4.13	0.663	4.36	0.452	4.47	0.441
C3	3.87	0.515	4.08	0.359	4.11	0.347
平均计算精度/%			94.07	69.810	92.07	66.410

### 3 结论

通过数值模拟,分析了初始缺陷的存在对混凝土材料力学性能的影响规律。将数值模拟结果与所做试验结果相对比,发现数值模拟结果合理,从而得出以下结论:

1)不论初始缺陷存在与否,混凝土试件损伤最先出现在试件底部受拉区,随后向试件中部转移。不同的是,存在初始缺陷的混凝土试件在底部损伤发展的同时,内部初始缺陷区域面积会增加,出现相互连通的现象,此现象在传统模型中无法体现。

2)从整个加载过程来看,初始缺陷的存在对混凝土模型的动强度影响主要体现在加载初期,而当荷载值达到并超过材料强度点时,此影响效果明显减弱。

3)通过与传统数值计算结果以及试验结果的对比,发现改进后的模型继承了传统模型优点,与此同时还能够提高计算精度,使结果更加贴近工程实际,可以完全取代传统的数字混凝土随机骨料模型。

4)讨论了当初初始缺陷单元数量占分析区域单元总数1%时,对混凝土材料强度的影响规律,但是,若初始缺陷所占比例增加,会对混凝土材料带来什么样的影响,将在以后的研究中继续深入。

#### 参考文献:

- [1] Masahiko Y, Masayasu O. Case studies on ungrouted tendon-duct in prestressed concrete models by Sibie [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24: 2376-2380.
- [2] Sagar R V, Prasad B K R. An experimental study on

- acoustic emission energy as a quantitative measure of size independent specific fracture energy of concrete beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25:2349-2357.
- [3] 王岩, 吴胜兴, 周继凯, 等. 小湾拱坝湿筛与三级配混凝土静态弯拉声发射特性[J]. *振动与冲击*, 2011, 30:10-17.  
WANG Yan, WU Shengxing, ZHOU Jikai, et al. Acoustic emission characteristics of wet sieving concrete and three-graded one in Xiaowan arch dam under static flexural-tensile [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30: 10-17.
- [4] 周继凯, 吴胜兴, 苏盛, 等. 小湾拱坝湿筛混凝土动态弯拉应变率效应试验研究[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(5):140-146.  
ZHOU Jikai, WU Shengxing, SU Sheng, et al. Experimental study of strain rate effect on dynamic flexural-tensile properties of wet sieving concrete in Xiaowan arch dam [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(5):140-146.
- [5] 周继凯, 吴胜兴, 苏盛, 等. 小湾拱坝湿筛混凝土动态弯拉力学特性试验研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(1):73-79.  
ZHOU Jikai, WU Shengxing, SU Sheng, et al. Experimental study on dynamic flexural-tensile mechanical behavior of wet sieving concrete of Xiaowan Arch Dam [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(1): 73-79.
- [6] 丁卫华, 陈厚群, 尹小涛, 等. 类岩石材料 CT 动载试验装置的关键技术研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(8):1620-1628.  
DING Weihua, CHEN Houqun, YIN Xiaotao, et al. Study of key techniques of dynamic loading CT test device for rock-like material [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(8): 1620-1628.
- [7] 丁卫华, 陈厚群, 党发宁, 等. 与医用 CT 配套的便携式材料试验机的研制及其在混凝土损伤研究中的应用[J]. *实验力学*, 2009, 24(3):207-214.  
DING Weihua, CHEN Houqun, DANG Faning, et al. Manufacture of portable material test device forming a complete set with medical X-ray CT and its application in concrete damage study [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(3): 207-214.
- [8] 郑丹, 李庆斌. 考虑细观缺陷和静力本构的混凝土动力本构模型[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2004, 3:410-412.  
ZHENG Dan, LI Qingbin. Dynamic constitutive equations for concrete based on meso-cracks and a static constitutive model [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2004, 3: 410-412.
- [9] 马怀发, 王立涛, 陈厚群, 等. 混凝土动态损伤的滞后特性[J]. *水利学报*, 2010, 41(6):59-64.  
MA Huaifa, WANG Litao, Chen Houqun, et al. Mechanism of dynamic damage delay characteristic of concrete [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(6):59-64.
- [10] 马怀发, 陈厚群, 吴建平, 等. 大坝混凝土三维细观力学数值模型研究[J]. *计算力学学报*, 2008, 25(2):241-247.  
MA Huaifa, CHEN Houqun, WU Jianping, et al. Study on numerical algorithm of 3D meso-mechanics model of dam concrete [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2008, 25(2):241-247.
- [11] 陈厚群, 马怀发, 李运成. 随机骨料模型形态对大坝混凝土弯拉强度的影响[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2007, 5(4):241-246.  
CHEN Houqun, MA Huaifa, LI Yuncheng. Influence of random aggregate shapes on flexural strength of dam concrete [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2007, 5(4): 241-246.
- [12] Shi Z H, Suzuki M. Numerical studies on load-carrying capacities of notched concrete beams subjected to various concentrated loads [J]. *Construction and Building Materials*, 2004, 18:173-180.
- [13] Shi Z H, Nakamura Y, Nakano M. Numerical studies on multistage strength degradation of notched concrete beams under sequential loading [J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33:1140-1150.
- [14] Skarzynski L, Tejchman J. Calculations of fracture process zones on meso-scale in notched concrete beams subjected to three-point bending [J]. *European Journal of Mechanics Solids*, 2010, 29:746-760.
- [15] 党发宁, 田威, 韩文涛, 等. 混凝土破裂过程三维数值模拟及 CT 验证[J]. *水利学报*, 2006, 37(6):74-80  
DANG Faning, TIAN Wei, HAN Wentao, et al. 3-D numerical simulation of concrete failure process and CT verification [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(6): 74-80.