

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.02.013

湿筛混凝土试件的静、动破坏数值模拟

杜成斌,江守燕,徐海荣,雷冬

(河海大学力学与材料学院,江苏南京 210098)

摘要:基于数字图像方法重构生成与真实骨料一致的混凝土骨料模型.混凝土各相材料的本构模型采用混凝土塑性损伤本构模型,考虑材料的应变软化,对湿筛混凝土试件的静、动破坏进行研究.研究表明:(a)混凝土的应力-裂缝宽度模型适用于骨料、砂浆和界面等各相材料.(b)随着应变率增加,混凝土的破坏形式明显由单条宏观裂纹向多条裂纹变化.(c)材料惯性对材料破坏荷载有一定影响,当应变率达到 60 s^{-1} 时材料的动力增强因子明显增大,惯性影响不可忽略;当应变率达到 80 s^{-1} 时材料惯性对材料破坏荷载影响较大;当应变率小于 207.8 s^{-1} 时由率效应引起的动力强度增加大于由惯性效应引起的动力强度增加.

关键词:湿筛混凝土试件;动力增强因子;应力-裂缝宽度模型;应变率;破坏试验;材料惯性

中图分类号:TV32+1;TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)02-0195-06

Numerical simulation of static and dynamic failure of wet-screened concrete specimen

DU Cheng-bin, JIANG Shou-yan, XU Hai-rong, LEI Dong

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

Abstract: Reconstruction of the internal structures for concrete composites was performed using digital imaging technology. With consideration of strain softening, the concrete plastic-damage model was adopted as the constitutive model for each material component to study the static and dynamic failure of the wet-screened concrete specimen. The results show the following: (a) The stress-crack width model is suitable for aggregate particles, cement matrix, and the interfacial transitional zone (ITZ). (b) With the increase of the strain rate, the failure mode of concrete transforms from single macro-cracks to multiple perforated cracks. (c) The inertia of material has an effect on the failure load. When the strain rate reached 60 s^{-1} , the dynamic increase factor (DIF) increased significantly, which indicates that the inertial effect cannot be neglected. When the strain rate reached 80 s^{-1} , the inertial effect had a significant effect on the failure load. In addition, the increase of dynamic strength induced by the strain rate effect was greater than that induced by the inertial effect when the strain rate was less than 207.8 s^{-1} .

Key words: wet-screened concrete specimen; dynamic increase factor; stress-crack width model; strain rate; failure test; inertia of material

由于试验条件的限制,大坝混凝土的力学性能常常依据湿筛混凝土试件进行^[1].现今大坝混凝土抗力评价指标参数较多地依据湿筛混凝土试件给出,因此,这对湿筛混凝土试件的静、动力破坏及其力学性能研究有重要的意义.

现有研究表明,混凝土是由骨料、水泥砂浆和二者间的黏结带组成的三相材料,材料的宏观力学性能受其细观构造的控制,宏观上的破坏行为是由于细观尺度上的损伤和断裂行为的累积和发展所导致的结果,其破坏过程实际上是内部微裂缝的成核、扩展、贯通进而失稳的过程,将宏观、细观二者结合起来,寻找有效的

收稿日期:2011-03-02

基金项目:国家自然科学基金(50779011,11132003);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2007CB714104);江苏省研究生培养创新工程项目(CX10B_2022)

作者简介:杜成斌(1965—),男,江苏盐城人,教授,博士,主要从事水工结构工程中力学问题的研究.E-mail:cbdu@hhu.edu.cn

数值模拟方法,结合理论和试验结果,数值模拟混凝土的结构与性能之间的关系,目前已成为科学研究者研究混凝土材料本构关系的主要研究方法之一^[2]。许多学者应用统计学理论,根据真实骨料形状及其分布规律提出了多种随机骨料模型:王宗敏^[3]提出了二维混凝土圆形、任意形状骨料随机投放算法,根据混凝土骨料的级配随机产生混凝土骨料结构;Garboczi等^[4]应用球谐函数来描述骨料形状,生成与天然石料形状相似的骨料;Wriggers等^[5]研究了投放算法提高骨料投放含量,并与试验结果对比验证了模型的准确性;杜成斌等^[6]、孙立国等^[7]针对大坝等大体积混凝土骨料含量较高(60%~70%)的特点,提出了一种对基骨料进行一次性定位的高效投放算法;李运成等^[8]在球形随机骨料结构的基础上建立了空间凸体随机骨料模型;李建波等^[9]在满足各类指定骨料级配曲线的情况下,针对任意形状及大小骨料颗粒的生成与投放过程,提出了一种改进算法,突破了传统凸形骨料的投放限制。然而,现有研究多数假定骨料为圆(椭圆)形或球(椭球)形,即使是任意多边形(多面体),也与天然石料形状有一定差别,从而导致数值模拟得到的力学性能与真实结果有一定差距。在混凝土材料动强度增强因子研究方面,目前认为惯性、应变率、孔隙中的黏滞阻尼和变形滞后等多种因素均有影响,但由于问题的复杂与难度较大,至今研究进展并不大。

笔者基于文献[10]提出的数字图像方法,依据有关数字图像进行骨料结构重构,以建立与实际混凝土骨料形状、分布接近的骨料模型,在此基础上建立细观混凝土有限元模型并进行静、动力分析。把静载下湿筛混凝土梁弯拉破坏的数值模拟结果与试验结果进行对比以确定模型有关参数的合理性,对湿筛混凝土梁的动载破坏进行研究,主要讨论惯性效应、应变率效应对混凝土材料动态增强因子的影响。

1 计算分析模型

1.1 材料本构模型

笔者的研究基于 ABAQUS 平台,混凝土各相材料的本构模型采用混凝土塑性损伤本构模型^[11]。文献[11]认为混凝土材料的破坏是因为拉伸开裂与压缩破坏引起的,其模型通过引入受拉损伤变量和受压损伤变量对刚度退化进行模拟。塑性损伤可表示为

$$\sigma = (1 - d) \bar{\sigma} \quad \bar{\sigma} = D_0 (\epsilon - \epsilon_{pl}) \tag{1}$$

$$\dot{\epsilon}_{pl} = h(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}_{pl}) \cdot \dot{\epsilon}_{pl} \quad \dot{\epsilon}_{pl} = \lambda \partial \alpha(\bar{\sigma}) / \partial \bar{\sigma} \tag{2}$$

式中: σ ——名义应力; $\bar{\sigma}$ ——有效应力; d ——损伤指标; D_0 ——材料的弹性本构矩阵; $\bar{\epsilon}_{pl}$ ——等效塑性应变; $\dot{\epsilon}_{pl}$ ——等效塑性应变率; h ——硬化函数; λ ——塑性乘子; G ——塑性势函数。

式(1)定义了考虑损伤时有效应力与弹性应变之间的关系;式(2)定义了混凝土的塑性行为。

塑性流动法则基于 Drucker-prager 流动面的非关联流动,其公式为

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi \tag{3}$$

式中: G ——塑性势函数; ϵ ——取决于偏心率、用来定义塑性势方程在 $\bar{p}$ - $\bar{q}$ 平面上靠近渐近线的程度的参数(偏心率为零时塑性势方程趋于直线); σ_{t0} ——单轴极限抗拉强度; ψ ——材料的膨胀角。

为减少裂缝开裂计算的网格依赖性,应力峰值后以拉应力-裂缝宽度曲线^[12]代替应力-应变全曲线的下降段(图1)来表征各相材料的应变软化行为。图1中 G_f 表示混凝土材料的断裂能, W_c 表示极限裂缝宽度。

混凝土各相材料应变率效应的影响采用文献[13]推荐的受拉的应力-应变关系:

$$f_t = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1.016\delta} & \dot{\epsilon} \leq 30 \text{ s}^{-1} \\ \beta \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1/3} & \dot{\epsilon} > 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \tag{4}$$

式中: f_t ——动力抗拉强度, Pa; f_{ts} ——静态抗拉强度, Pa; f_t/f_{ts} ——受拉时的动力增大系数; $\dot{\epsilon}$ ——应变率, 其取值范围为 $(3 \times 10^{-6} \sim 300) \text{ s}^{-1}$; $\dot{\epsilon}_s$ ——静态应变率, $\dot{\epsilon}_s = 3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; $\lg \beta = 7.11\delta - 2.33$, $\delta = 1/(10 + 6f_{cs}/f_{c0})$, $f_{c0} = 10 \text{ MPa}$ 。

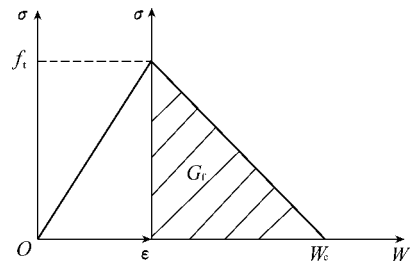


图1 各相材料本构模型

Fig. 1 Constitutive model for material components

1.2 骨料模型及其静力验证

采用自行研制的数字图像及其识别软件重构混凝土二维骨料模型 ,具体识别方法可参阅文献 [10]。图 2 为其中某试件(在此共识别并计算了 3 根梁)最终的有限元网格剖分示意图。根据弯拉梁的受力特点选择跨中 150 mm 区间考虑材料非均质性并进行骨料识别。计算中采用的有关参数见表 1。

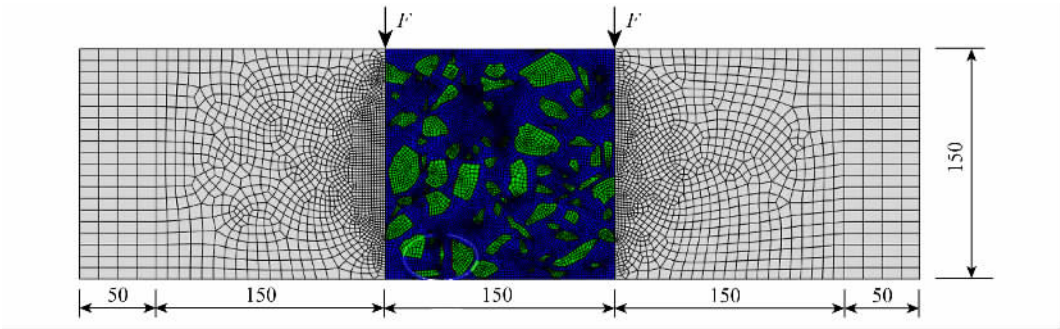


图 2 有限元网格剖分示意图(单位 :mm)

Fig. 2 Schematic profile map of finite element mesh (Unit : mm)

图 3 给出了试验与数值模拟关于该试件的裂缝初始发生和扩展的过程比较 ,从中可看出数值模拟的裂缝位置与试验结果很接近 ,最终的裂缝形态与试验结果也比较吻合。图 4 为最终裂缝形状与位置比较。图 5 为 2 个试件(试件 1 和试件 2)的荷载 ~ 位移曲线比较 ,可以看出在上升段数值模拟结果与试验结果基本吻合 ,破坏荷载二者基

表 1 计算采用的混凝土各相材料参数

Table 1 Mechanical parameters for material components				
材料分区	弹性模量/ GPa	泊松比	抗拉强度/ MPa	极限裂缝 宽度/mm
混凝土	28.0	0.17		
砂 浆	22.5	0.22	3.47	0.096
骨 料	40.0	0.16	5.37	0.096
界 面	20.0	0.16	2.16	0.096

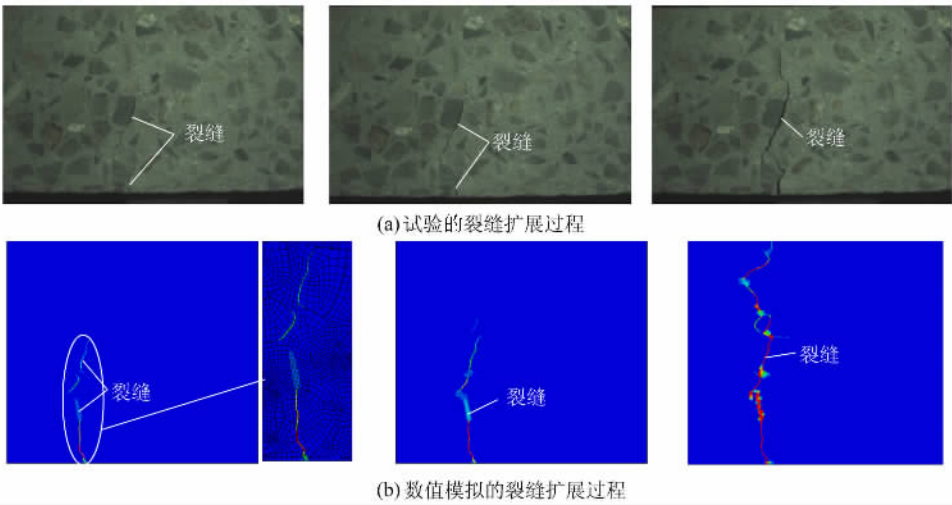


图 3 数值模拟与试验的裂缝扩展比较

Fig. 3 Comparison of crack propagation processes obtained from experiment and numerical simulation



图 4 最终裂缝形状与位置比较

Fig. 4 Comparison of final shapes and locations of cracks obtained from experiment and numerical simulation

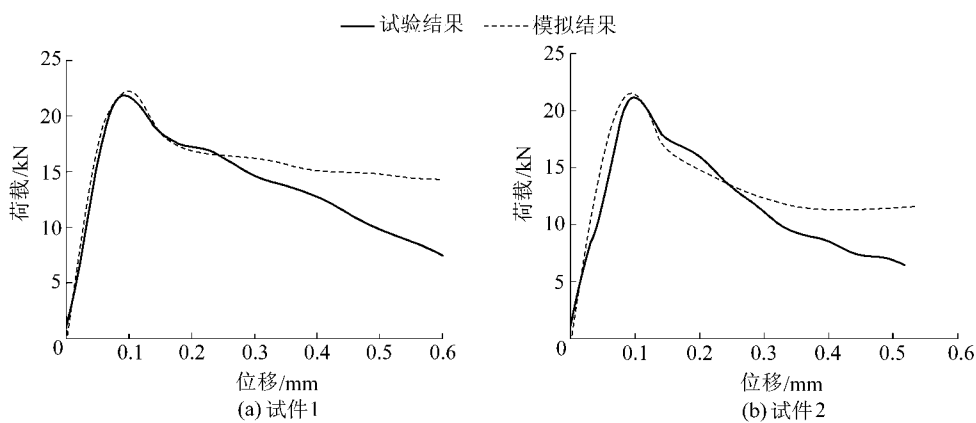


图5 数值模拟与试验的荷载~位移曲线比较

Fig. 5 Comparison of load-displacement curves obtained from experiment and numerical simulation

本一致,下降段趋势也基本一致.说明本文模型可以进行混凝土材料的失效机理研究.

2 混凝土材料动力强度提高机理

2.1 惯性对材料动力增强因子的影响

计算模型同前.采用不同的加载速度,但不考虑材料的率效应来研究惯性对混凝土材料动力增强因子的影响.加载速度范围为0.01~20 m/s.图6为计算得到的荷载-跨中位移曲线.从图6可以看出在加载速度达到0.5 m/s($\dot{\epsilon}=60\text{ s}^{-1}$)以后破坏荷载明显增加.

定义材料强度的动力增强因子(DIF)为动载下试件极限强度与静载下试件极限强度的比值.定义应变率为梁跨中底部单元应变随时间的最大变化率,作出DIF与 $\dot{\epsilon}$ 的关系曲线(图7).由图7看出,在 $6.7\text{ s}^{-1}\leq\dot{\epsilon}\leq 60\text{ s}^{-1}$ (对应的横坐标区间为 $0.83\leq\lg(\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1})\leq 1.78$)区间内曲线变化平缓,基本呈线性关系,但直线斜率很小;当 $\dot{\epsilon}>60\text{ s}^{-1}$ (对应的横坐标为 1.78 s^{-1})后,惯性对动力增强因子影响较大.通常地震作用下材料的应变率在 $10^{-4}\sim 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 之间,这个区间内惯性的影响比较小.

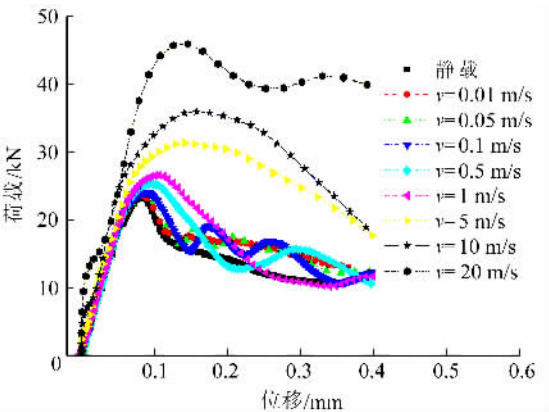


图6 荷载-跨中位移曲线

Fig. 6 Load-midspan displacement curves

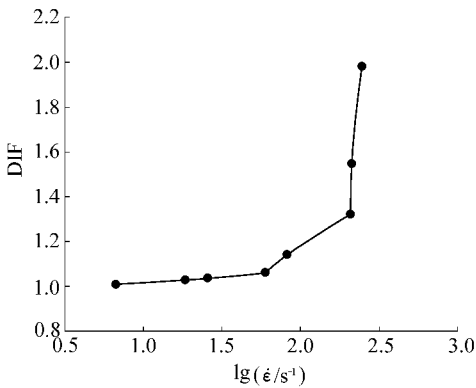


图7 惯性对DIF的影响

Fig. 7 Effect of inertia on DIF

图8给出2个典型加荷速度下的截面破坏形式,可以发现:低加荷速度下的最终破坏形式为1条宏观裂缝,高加载速度下的破坏呈现明显的多条裂缝,且有裂缝穿过骨料的现象发生.

2.2 材料应变率对混凝土材料动力增强因子的影响

考虑材料应变率效应后,动力增强因子明显提高.为验证数值方法的合理性,将计算得出的DIF与通过式(4)得到的各相材料骨料、砂浆以及界面过渡区的DIF与 $\dot{\epsilon}$ 的关系进行比较(见图9(a)).从图9(a)可以看出,数值模拟得到的曲线与通过式(4)计算结果得到的曲线在规律和变化趋势上均较为一致.值得注意的是,各相材料的综合效应得到的DIF(数值模拟方法)低于各相材料的DIF(式(4)结果).同时,所得结果还表明:

当 $\dot{\epsilon} > 25.7 \text{ s}^{-1}$ 时 $\dot{\epsilon}$ 对材料 DIF 的影响较大,且 $\dot{\epsilon}$ 越高其影响越明显.

图 9 (b) 为 $\dot{\epsilon}$ 对 DIF 的贡献. 比较图 7 和图 9 (b) 可看出: 当 $\dot{\epsilon} < 207.8 \text{ s}^{-1}$ (对应的横坐标为 2.32) 时, 由 $\dot{\epsilon}$ 引起的 DIF 的增加大于由惯性效应引起的 DIF 增加; 当 $\dot{\epsilon} > 207.8 \text{ s}^{-1}$ 时, 材料 DIF 的增加主要由惯性控制.

2.3 初始缺陷对动力破坏的影响

随着骨料粒径或试件的增大, 其初始损伤的概率也相应加大, 砂浆中各种因素引起的初始损伤也加大, 这些初始损伤对材料的

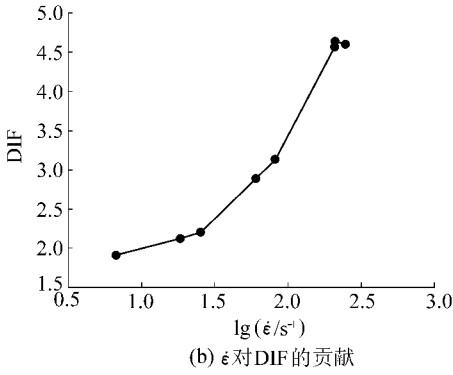
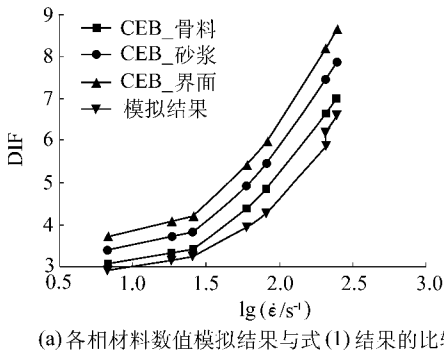


图 9 计及率效应时 DIF 与 $\dot{\epsilon}$ 的关系
Fig. 9 Relationship between DIF and $\dot{\epsilon}$ with consideration of effect of strain rate

力学性能有较大影响, 会弱化材料的宏观力学性能^[14], 因此初始损伤对材料动态强度的影响是非常重要的.

笔者对加载速度为 1 m/s 时, 试件孔隙率分别为 0.00% (无初始损伤), 0.44% , 1.16% 以及 4.31% 的 4 种情况下试件的动态强度及破坏形态进行了初步探讨. 图 10 为不同孔隙率下的荷载-位移曲线, 从图中可看出, 随着孔隙率的增加, 试件的动态强度明显降低. 图 11 给出了不同孔隙率下试件的最终裂纹形态, 当孔隙率较小时, 裂纹的位置与无初始损伤时的裂纹位置接近, 而孔隙率继续增大时裂纹起裂的位置发生明显变化.

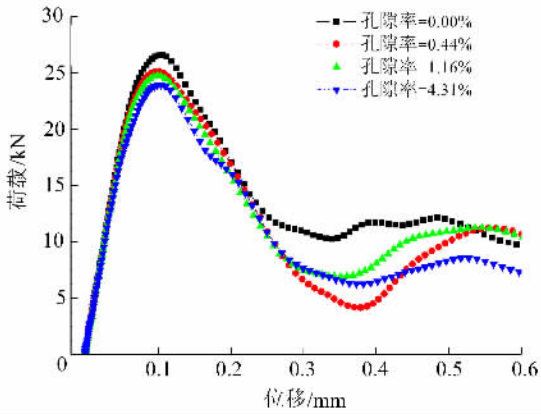


图 10 不同孔隙率下的荷载-位移曲线
Fig. 10 Load-displacement curves with different porosities

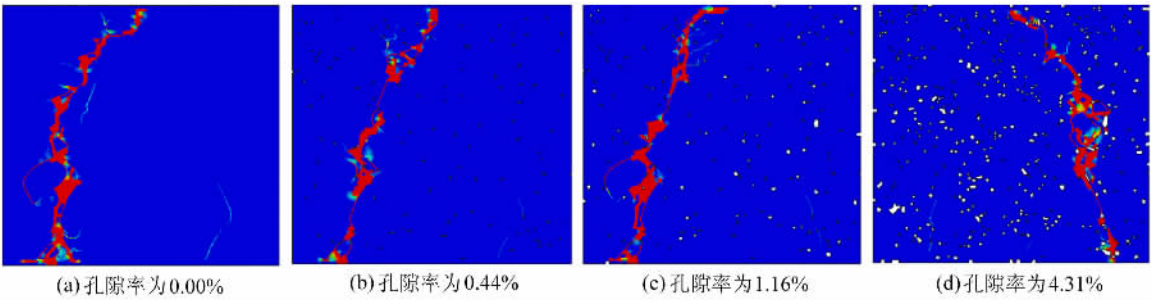


图 11 不同孔隙率下试件的裂纹形态
Fig. 11 Crack shapes of specimen with different porosities

3 结 语

静力数值模拟与试验对比表明,采用数字图像技术

识别并重构混凝土骨料结构以建立计算模型的方法是可行的,混凝土的应力-裂缝宽度模型适用于骨料、砂浆和界面等各相材料模型。动力数值模拟表明:(a)随着材料 ϵ 的增加,混凝土的破坏形式明显由单条宏观裂纹向多条裂纹变化。(b)当 $\epsilon < 60 \text{ s}^{-1}$ 时材料惯性对破坏荷载影响较小;当 $\epsilon > 60 \text{ s}^{-1}$ 时动力强度增强因子明显增大,惯性影响不可忽略;当 $\epsilon = 80 \text{ s}^{-1}$ 时材料惯性对破坏荷载影响较大;当 $\epsilon < 207.8 \text{ s}^{-1}$ 时由 ϵ 引起的动力强度增加大于由惯性效应引起的动力强度增加。(c)随着孔隙率的增加,其动力强度明显降低,当孔隙率较小时裂纹的位置与无初始损伤时裂纹位置接近,而孔隙率增大时裂纹起裂位置会发生明显变化。

参考文献:

- [1] 郑丹,李文伟.预测全级配大坝混凝土弹性模量的三相模型[J].水利水电科技进展,2009,29(4):14-17.(ZHENG Dan, LI Wen-wei. Three-phase model for predicting elastic modulus of full-grade dam concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(4):14-17. (in Chinese))
- [2] 唐春安,朱万成.混凝土损伤与断裂-数值试验[M].北京:科学出版社,2003.
- [3] 王宗敏.不均质材料(混凝土)裂隙扩展及宏观计算强度与变形[D].北京:清华大学,1996.
- [4] GARBOCZI E J, BULLARD J W. Shape analysis of a reference cement[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(10):1933-1937.
- [5] 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.
- [6] DU Cheng-bin, SUN Li-guo. Numerical simulation of aggregate shapes of two dimensional concrete and its application[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2007, 20(3):172-178.
- [7] DU Cheng-bin, SUN Li-guo, JIANG Shou-yan, et al. Numerical simulation of aggregate shapes of three-dimensional concrete and its applications[J]. International Journal of Aerospace Engineering, ASCE, 2012, doi:10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000181.
- [8] 李运成,马怀发,陈厚群.混凝土随机凸多面体骨料模型生成及细观有限元剖分[J].水利学报,2006,37(5):588-592.(LI Yun-cheng, MA Huai-fa, CHEN Hou-qun. Approach to generation of random convex polyhedral aggregate model and plotting for concrete meso-mechanics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5):588-592. (in Chinese))
- [9] 李建波,林皋,陈健云.随机凹凸型骨料在混凝土细观数值模型中配置算法研究[J].大连理工大学学报,2008,48(6):869-874.(LI Jian-bo, LIN Gao, CHEN Jian-yun. Numerical generation and efficient distribution for random shape aggregates in mesoscopic concrete model[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(6):869-874. (in Chinese))
- [10] 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 Cheng-bin, SUN Li-guo. Meso-level analysis model for concrete based on digital image processing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4):431-439. (in Chinese))
- [11] LUBLINER J, OLIVER J, OLLERR S et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3):229-326.
- [12] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite element[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6):773-782.
- [13] CEB-FIP model code 1990 Redwood Book[S].
- [14] 姚婷,杜成斌,孙立国.含缺陷混凝土细观损伤破坏过程的数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(1):66-72.(YAO Ting, DU Cheng-bin, SUN Li-guo. Numerical simulation of meso-damage and failure process of concrete with defect[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(1):66-72. (in Chinese))