

基于细观离散元的混凝土端部效应分析

康 政¹, 唐欣薇¹, 秦 川², 周小文³

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 510640 广州; 2. 天津滨海新区建设投资集团有限公司, 300457 天津;
3. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 510640 广州)

摘 要: 为了研究端部效应对不同形状的混凝土试件强度的影响, 采用三维颗粒离散元程序(PFC^{3d})对混凝土标准立方体与标准圆柱体试件在不同端部摩擦条件下的单轴压缩试验进行数值仿真. 在细观层次假定混凝土材料力学性质符合Weibull 概率统计分布来考虑混凝土材料的非均质特性, 根据材料宏观力学参数反演计算出模型细观力学参数, 进行数值仿真计算. 模拟结果表明, 端部摩擦对不同形状的混凝土试件的抗压强度、变形特征及破坏模式有较大影响; 试件的形状效应随着加载板与试件间摩擦系数的增加而增强; 当不采用减摩措施($f = 0.6$)时, 测得两种试件强度的折算系数为0.795. 仿真结果与规范的规定相符, 证明了本文方法的可行性和有效性.

关键词: 混凝土; 抗压强度; 形状效应; 端部摩擦; 数值仿真

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)12-0094-05

End effect of concrete by meso-scale discrete element modeling

KANG Zheng¹, TANG Xinwei¹, QIN Chuan², ZHOU Xiaowen³

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, 510640 Guangzhou, China;

2. Tianjin Binhai New Area Construction & Investment Group Co. Ltd., 300457 Tianjin, China;

3. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, 510640 Guangzhou, China)

Abstract: To investigate the influence of end friction on compressive strength with different specimen shapes, we present a three-dimensional particle element approach for concrete, a series of numerical uniaxial compressive tests for standard cube specimen and standard cylinder specimen are conducted. The material properties are assumed to conform to the Weibull distribution law in consideration of its heterogeneity, and a method of parameter inversion calculation is used to get the mesoscopic mechanics parameters based on the material mechanics parameters. The results show that the end friction influences the peak strength, deformation character and failure mode of different geometries of concrete specimen. Shape effect increases as the friction coefficient between the platens of the testing machine and the concrete specimen increases; and the conversion ratio between cylinder and cube strength approaches 0.795 without any friction-reducing measure ($f = 0.6$). The simulation results accord well with the codes, which shows the feasibility and effectiveness of the method.

Key words: concrete; compressive strength; shape effect; end friction; numerical simulation

抗压强度是混凝土的基本力学指标, 与水泥标号、水泥用量、水灰比、配合比、施工方法、养护

条件等因素有关. 试验方法及试件形状尺寸也会影响所测得的强度值. 各国对于混凝土强度指标的规定都制定了各种严格和标准的试验方法. 迄今为止, 在国际上对抗压强度试件的形状、尺寸尚未完全统一, 总体来说, 测量混凝土抗压强度所用的标准试件主要有 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体和 Φ150 mm×300 mm 圆柱体两种^[1]. 不同几何形状的试件受压过程并不相同, 通常认为, 试件的形状会影响试件端部效应和变形破坏的局部

收稿日期: 2013-02-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109083); 中央高校基本科研业务费资助项目(2012ZM0091); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室自主基金资助项目(2013ZC04).

作者简介: 康 政(1987—), 男, 硕士;

周小文(1965—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 唐欣薇, cttangxw@scut.edu.cn.

性, 从而影响混凝土的强度. 因此, 国内外许多学者都作了很多有意义的探索. 文献[2]对不同形状的混凝土试件单轴压缩强度进行了系统的试验研究. 文献[3-4]将形状效应归因于试件与加载板之间的摩擦作用. 文献[5]采用有限元对不同形状混凝土试件的抗压强度进行了分析. 文献[6]基于三维破坏数值模型对岩石类材料的形状效应产生的机理进行了模拟研究. 虽然人们在以上领域的研究取得了诸多成果, 并建议将标准圆柱体试件与标准立方体试件测得的抗压强度折算系数设定为 0.79~0.81, 但是, 目前仍是缺乏理论及数值分析系统地研究端部效应对不同形状的混凝土试件强度的影响^[5].

颗粒离散元可以模拟出材料复杂的力学行为, 如局部化现象、应变软化现象和剪切膨胀效应等, 并揭示其力学机理. 较之连续介质力学计算方法, 颗粒离散元在模拟材料细观破坏过程方面有着独特的优势, 因此, 本文选择颗粒离散元作为混凝土端部效应细观数值仿真模拟的工具. 基于三维离散元颗粒程序 PFC^{3d} (particle follow code^{3d}), 本文建立了混凝土等效概率模型, 对标准圆柱体试件与标准立方体试件在不同端部条件下的单轴压缩试验进行了数值仿真, 分析了端部效应对试件的测试强度和破坏模式的影响.

1 混凝土等效概率模型

混凝土是一种高度不均匀、不连续的复合材料, 在细观层次上骨料颗粒、孔隙等在基质中随机分布, 使其具有强随机性. 本文考虑到材料的随机特性建立了混凝土等效概率模型, 即未区分混凝土骨料、砂浆、交界面等组分, 但引入概率统计的方法, 假定组成混凝土材料单元的力学性质 (如弹性模量、强度等) 在空间位置上满足 Weibull 函数分布, 用以描述其力学性质的非均匀性, 分布密度函数为

$$f(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{u}{u_0} \right)^m \right]. \quad (1)$$

式中: u 为满足该分布参数 (如强度、弹性模量、泊松比等) 的数值; u_0 为一个与均值 $E(u)$ 相关的参数; m 为材料均质度, m 值反映了统计模型中材料结构的均匀程度, 当其由小到大变化时, 材料细观单元强度分布函数由扁而宽向高而窄变化, 细观单元强度趋于均匀, 且材料内部所包含的大部分细观单元接近给定的参数 u_0 ^[7].

本文基于上述混凝土等效概率模型, 将 $\Phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 标准圆柱体与 $150 \text{ mm} \times$

$150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 标准立方体试件离散为粒径为 4~6 mm 的颗粒单元, 单元数目分别为 4 290、2 145.

2 细观力学参数的选取方法

2.1 颗粒离散元计算原理

Cundall 等^[8]将离散元的概念拓展应用于散粒体材料的力学研究, 形成了颗粒体离散元. 颗粒离散元的基本计算原理如图 1 所示. 首先根据颗粒单元的位置和半径确定单元相互间的接触关系, 对于相互接触的单元, 采用接触本构模型 (力-位移定律) 计算颗粒单元间的接触力; 然后根据第 1 步计算得到的接触力, 运用牛顿第二定律, 计算颗粒单元运动的加速度、速度和位移, 更新颗粒单元的位置与相互的接触关系. 如此循环计算, 直到试件破坏或满足预定条件, 计算结束.

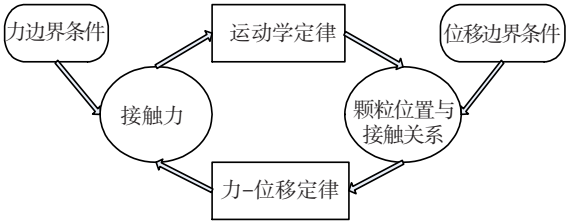


图 1 颗粒离散元计算原理

力-位移定律采用线弹性的接触本构模型为

$$F^n = K^n U^n, \quad (2)$$

$$\Delta F^s = -K^s \Delta U^s. \quad (3)$$

利用颗粒离散元计算连续介质固体力学时, 可用接触粘结模型 (contact bond) 将颗粒单元在接触处粘结起来. 粘结有一定的强度, 当法向接触力达到法向粘结强度 σ_n 时, 法向粘结被破坏, 法向不能再承受拉应力; 当切向接触力达到切向粘结强度 σ_s 时, 切向粘结被破坏, 切向运动满足摩擦滑移模型 (slip model): 当 $F_i^s > F_{\max}^s = \mu |F_i^n|$ 时, 滑动产生且 $F_i^s = \mu |F_i^n| (F_{\max}^s / F_i^n)$. 法向与切向的计算模型如图 2 所示.

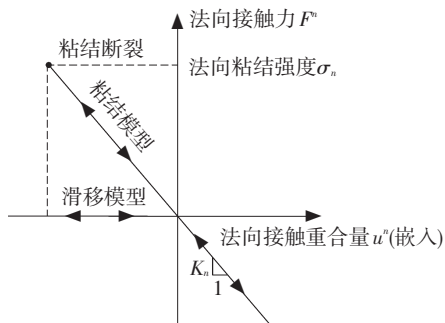
2.2 细观力学参数选取

采用颗粒离散元接触粘结模型进行计算时, 需要确定 5 个细观力学参数 K^n 、 K^s 、 σ_n 、 σ_s 、 μ , 而这些细观力学参数无法直接通过材料试验获得, 因此, 在进行数值计算前, 需要建立颗粒离散元细观力学参数与宏观材料力学参数之间的桥梁.

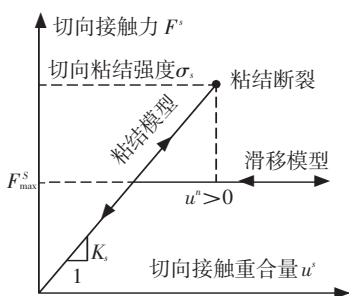
本文通过建立数值模型进行参数反演计算的方法, 探讨了颗粒离散元细观力学参数与材料宏观力学参数之间的关系, 并参考 Fakhimi 提出的量纲分析法^[9], 结合对混凝土进行数值仿真的需要, 提出一种细观力学参数的选取方法, 具体步骤如下.

确定颗粒离散元单元半径. 对于标准立方体

试件和标准圆柱体试件,考虑到计算时间和效率,取颗粒单元半径平均值为 5 mm;为保证生成试件的随机性,颗粒单元随机产生,半径满足 4~6 mm 的高斯分布。



(a) 法向计算模型



(b) 切向计算模型

图2 接触粘滞模型和滑移模型

确定材料泊松比 ν 与颗粒离散元的法、切向刚度比 K^n/K^s 之间的关系.随机生成 3 个颗粒离散元模型,进行单轴压缩试验.计算得到泊松比随着法、切向刚度比的增加而增加,如图 3 所示,用最小二乘法进行多项式拟合得

$$\nu = 0.1136 \left(\frac{K^n}{K^s} \right)^3 - 0.4591 \left(\frac{K^n}{K^s} \right)^2 + 0.606 \frac{K^n}{K^s} - 0.087. \quad (4)$$

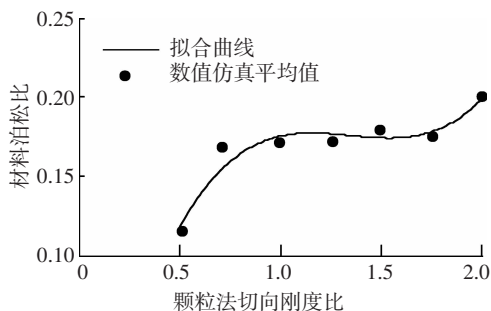


图3 泊松比与法切向刚度比关系

确定材料弹性模量 E 与颗粒离散元法向刚度比 K^n 之间的关系.本文采用的混凝土泊松比为 0.2,根据式(4)反算得 $K^n/K^s = 2.0$.随机生成 3 个 PFC^{3d} 标准立方体试件,进行单轴压缩试验.计算得到模型的弹性模量随着单元法向刚度的增加而增加,成正比关系;且随着法、切向刚度比的增加略有减小,如图 4 所示.用最小二乘法进行线性拟合得

$$E = 0.3189K^n + 0.2155. \quad (5)$$

本文采用的混凝土试件弹性模量为 25 GPa,由式(5)反算得到 $K^n = 88$ GPa.

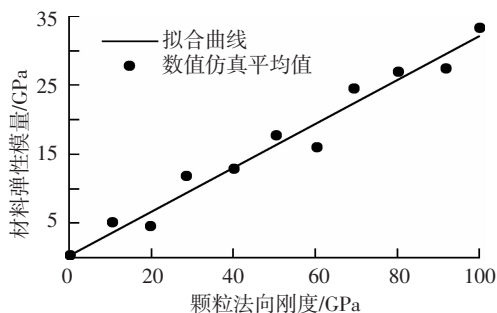


图4 弹性模量与法向刚度关系

确定 σ_n/σ_s .在颗粒离散元的数值计算中,粘滞断裂的破坏形式有两种:法向断裂破坏与切向断裂破坏.对破坏形式起控制作用的是接触粘滞的法、切向强度比值 σ_n/σ_s ,如果该比值很大,单元间只能发生切向破坏;反之,则只能发生法向破坏.

混凝土单轴压缩试验中拉、剪破坏同时存在,微观的接触粘滞应体现这两种类型的破坏.本文通过进行多组试算发现,在 $K^n/K^s = 2.0$ (对应 $\nu = 0.2$) 的条件下,当 $\sigma_n/\sigma_s = 1.0$ 时,颗粒离散元模型计算得到的数值仿真破坏现象与试验破坏现象相符.

确定 σ_n 和 σ_s .在确定接触粘滞的法向与切向强度比之后,即可根据实际试验试件的单轴压缩强度,通过数值仿真反演计算得到法向接触粘滞强度 $\sigma_n = 22.5$ MPa 和切向接触粘滞强度 $\sigma_s = 22.5$ MPa.

确定颗粒间滑移摩擦系数 μ .Potyondy 等^[10]认为,切向滑移摩擦模型是在颗粒单元发生切向断裂破坏后才被激活,因此滑移摩擦系数 μ 对数值仿真试件的峰值强度的影响较小,仅对破坏后应力应变关系曲线的软化段略有影响;目前尚未有明确的宏观量与之对应,本文参考文献[9-11]的成果,将颗粒单元间滑移摩擦系数 μ 设为 0.6.

综上可以得到本文计算所采用的主要力学参数均值, $E = 25$ GPa, $K^n = 88$ GPa, $K^n/K^s = 2.0$, $\sigma_s = 22.5$ MPa, $\sigma_n = 22.5$ MPa.结合文献[7],数值仿真计算中的均值度 m 取 10.

3 端部约束对混凝土抗压强度的影响

3.1 数值试验

为了研究加载板端部效应对不同形状混凝土试件抗压强度的影响,本文基于上述离散元数值概率模型对国际上通用的 150 mm×150 mm×150 mm 标准立方体试件(高宽比 $t = 1.0$)和 $\Phi 150$ mm×300 mm 圆柱体试件(高宽比 $t = 2.0$)在不同摩擦

系数下的单轴压缩试验进行了数值仿真. 由于端部效应的存在, 混凝土试件在靠近端部会存在复杂的应力分布, 许多学者采取多种措施来减少加载端部与试件之间的摩擦力, 进而消除或减小端部效应^[12-13]. 根据相关资料^[4], 钢板与混凝土试件间摩擦系数通常取 0.6. 在实验室, 通过涂铁氟龙、润滑油等措施, 减少钢板与混凝土试件之间的摩擦力. 为考虑不同的端部摩擦状况, 本文采用 7 组不同的摩擦系数, 即 $f = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$, 每组生成 8 个随机试件进行仿真试验, 如图 5 所示.

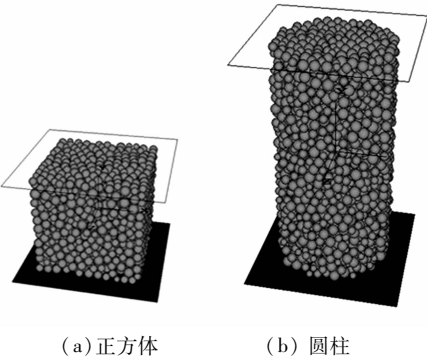


图 5 试件

采用文献[2]中普通混凝土材料宏观力学参数: 弹性模量 $E = 25 \text{ GPa}$ 、泊松比 $\nu = 0.20$ 、抗压强度 $f_c = 34.0 \text{ MPa}$, 按照 2.2 节的方法反演相应的细观颗粒元计算参数. 其中, 加载板 (wall) 的弹性模量设为 210 GPa .

3.2 计算结果与分析

立方体和圆柱体试件在 $f = 0, 0.6$ 两种不同端部约束条件下单轴压缩的破裂全过程应力-应变关系曲线如图 6 所示. 数值模拟获得的应力-应变曲线与试验曲线有良好的相关性, 表明这次数值模拟是成功的. 当加载端部是光滑情况时 ($f = 0$), 在加载初始阶段, 两组包络曲线几乎完全重合, 但是, 随着长宽比的增加, 混凝土的峰值强度略有降低, 并呈现一定的脆性特征, 如图 6(a) 所示. 当加载端约束较大时 ($f = 0.6$), 立方体试件相对于圆柱体试件破裂的延性增加, 峰值强度更大, 圆柱体试件破裂的延性增加, 峰值强度更大, 这种趋势与理想光滑端部结果相比更加明显, 如图 6(b) 所示.

从试件破裂形态来看, 在光滑端部情况下加载 ($f = 0$), 对于立方体混凝土试件, 裂纹在空间上分布比较弥散, 呈现以拉伸为主的破坏模式, 如图 7(a) 所示; 对于圆柱体试件, 裂纹出现于试件的中部, 试件的破坏主要是剪切破裂引起, 如图 7(b) 所示. 当加载端约束较强时 ($f = 0.6$), 由于加载端部弹性模量和混凝土试件弹性模量之

间不匹配造成变形不协调, 立方体试件在靠近加载端部的位置首先出现裂纹, 而在试件的中部由于端部限制作用的减小, 在内部形成了剪切带, 最终主要以剪切的形式破坏, 如图 8(a) 所示; 而对于圆柱体试件, 裂纹首先在试件的中部形成, 随着长宽比的增加, 加载端部对试件端部应力和变形破坏的影响减小, 如图 8(b) 所示.

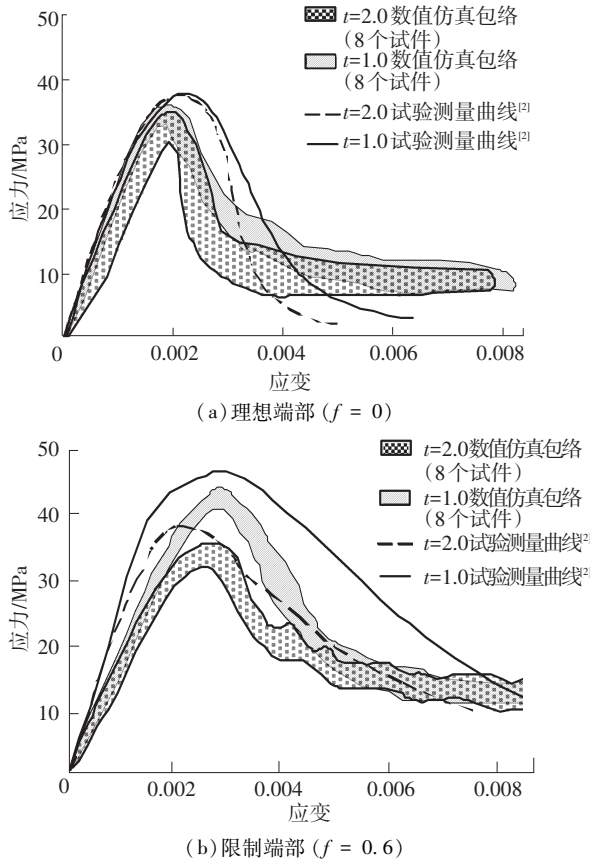


图 6 不同端部条件下的应力-应变曲线

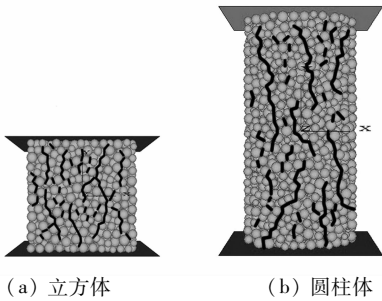


图 7 理想端部条件的试件破裂形态($f=0$)

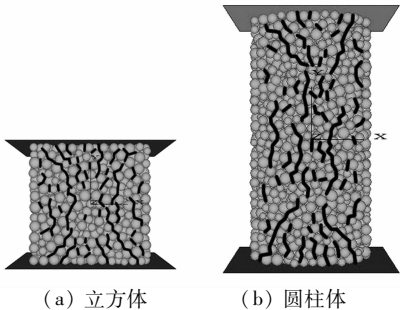


图 8 限制端部条件的试件破裂形态($f=0.6$)

图9是立方体试件和圆柱体试件的单轴压缩强度与端部摩擦系数的对应关系。不难得出,立方体试件受端部摩擦的影响非常显著,当加载板与试件之间的摩擦系数从0变化到0.6时,试件单轴压缩的平均强度从34.29 MPa增加至42.48 MPa。其中,当 $f = 0.3$ 时,立方体试件强度逐渐趋于稳定。相对于立方体试件,圆柱体试件受端部摩擦的影响则非常有限,试件单轴压缩的平均强度为33.71~33.78 MPa,变幅不大。

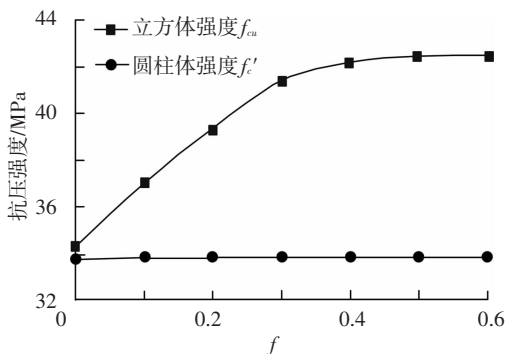


图9 抗压强度与摩擦系数关系

标准圆柱体试件与标准立方体试件抗压强度之比 f'_c/f_{cu} 随端部摩擦系数 f 的变化关系如图10所示。可见,在端部无摩擦状态下,即理想状态下($f = 0$),立方体试件与圆柱体试件的单轴压缩强度相近, f'_c/f_{cu} 接近于1。随着端部摩擦系数的增大, f'_c/f_{cu} 逐渐降低。当 $f = 0.5$ 时, f'_c/f_{cu} 趋于稳定,两者比值为0.795,与通常选取的折算系数相符。

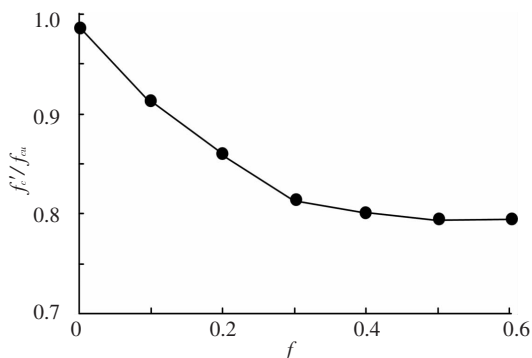


图10 f'_c/f_{cu} 与 f 的关系

4 结 论

1) 不同几何形状的试件受压过程中的受力并不相同,加载板与试件接触面之间的摩擦力将约束混凝土试件的横向膨胀,使得混凝土强度提高。这种约束作用离试件端部越远影响越小,因而,立方体与圆柱体试件在变形特征、破坏模式、峰值强度等方面出现了形状效应。

2) 数值仿真结果表明,混凝土试件单轴压缩强度的形状效应和加载板与试件间的摩擦状况相关,即端部摩擦系数越大,形状效应越明显。

3) 当不采取任何减摩措施时,即加载板与试件的摩擦系数为0.6时,采用标准立方体试件与标准圆柱体试件测定的混凝土抗压强度的折算系数为0.795,这与规范的规定相符。

参考文献

- [1] 李崇智,周文娟,王林. 建筑材料[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [2] VAN MIER J G M. Strain-softening of concrete in uniaxial compression [J]. Materials and Structures, 1997, 30:195-209.
- [3] L' HERMITE R. Idées actuelles sur la technologie du béton [J]. Bull RILEM, 1954 (18): 27-40.
- [4] HANSEN H, KIELLAND A, NIELSEN K E C, et al. Compressive strength of concrete-cube or cylinder [J]. Bull RILEM, 1962 (17): 31-33.
- [5] INDELICATO F, PAGGI M. Specimen shape and the problem of contact in the assessment of concrete compressive strength [J]. Materials and Structures, 2008, 41:431-441.
- [6] 梁正召,唐春安,张娟霞,等. 岩石三维破坏数值模型及形状效应的模拟研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (4): 699-704.
- [7] TANG Xinwei, ZHOU Yuande, ZHANG Chuhan, et al. Study on the heterogeneity of concrete and its failure behavior using the equivalent probabilistic model [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2011, 23(4): 402-413.
- [8] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [9] FAKHIMI A, VILLEGAS T. Application of dimensional analysis in calibration of a discrete element model for rock deformation and fracture [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(2): 193-211.
- [10] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41: 1329-1364.
- [11] YOON J. Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44: 871-889.
- [12] MOGI K. Dilatancy of rocks under general triaxial stress states with special reference to earthquakes precursors [J]. Journal of Physics of the Earth, 1977, 25: 203-217.
- [13] 许东俊. 茂木岩石真三轴压缩仪的结构及特点 [J]. 岩土力学, 1980 (3): 77-84.

(编辑 魏希柱)