

文章编号: 1001-4888(2009)03-0251-08

基于颗粒流的混凝土材料数值实验研究^{*}

许尚杰^{1,2}, 尹小涛³, 马双科⁴, 党发宁¹

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 710048; 2. 山东省水利科学研究院, 济南 250013;

3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点试验室, 甘肃兰州 730000; 4. 西安公路研究所, 西安 710054)

摘要: 混凝土材料是一种典型的非均质材料, 其力学行为和破坏过程很复杂。本文利用 PFC 颗粒流软件的内嵌 fish 语言编写了骨料生成程序、边界条件控制程序, 程序模拟了 MTS 伺服功能, 实现了虚拟的混凝土单轴压缩试验。相对于一般有限元程序投放的骨料, 文中骨料可以破裂。在生成的数值试件基础上, 设计了单级配和全级配混凝土单轴压缩试验, 并对其破裂形态、裂纹扩展过程、应力应变曲线和破裂过程能量变化规律进行了研究。利用该虚拟试验平台, 可对混凝土的动、静力学特性进行系统研究。

关键词: 颗粒流; 混凝土; 骨料; 破裂; 数值试验

中图分类号: O319.56

文献标识码: A

0 引言

混凝土是一种多相复合材料, 内部结构非常复杂。用实验方法研究混凝土断裂既费时、费力, 且费用颇高、结果离散性较大。用数值方法模拟混凝土的损伤与断裂过程已越来越受到人们的重视。目前关于混凝土的数值模拟已经开展了许多研究工作, 其中彭一江^[1]、徐菁^[2]、马怀发^[3]采用二维数值模型进行了混凝土的破坏过程研究。关于多边形模型以王宗敏^[4]所建立的二维混凝土任意形状骨料随机投放算法最为成熟。清华大学的刘光廷^[5]进行了三维凸型混凝土骨料随机投放算法的研究。综上, 目前对二维数值混凝土模型的研究较多^[1-8], 二维骨料模型以圆形骨料为主, 也比较成熟, 但大多选用有限元方法。受有限元方法的限制, 对于混凝土破裂过程中的多裂纹体系的扩展计算效果不好, 所以当前数值混凝土的研究还很难提到用以解决混凝土的破损机理的高度^[1-9]。

颗粒流程序是一种离散单元法, 它通过模拟圆形颗粒介质的运动及其相互作用来研究颗粒介质的特性。在此基础上, 通过一种非连续的数值方法来解决含有复杂变形模式的实际问题。在具有颗粒结构特性的介质中, 从其细观力学特征出发, 把材料的力学响应问题从物理域映射到数学域内进行数值求解。物理域内真实的颗粒被数学抽象为颗粒单元, 通过颗粒单元构造试样几何性状, 通过接触本构关系形成相互作用, 通过迭代分析使得数值试样的宏观力学特性逼近真实材料的力学特性^[10-14]。

数值实验的优点在于可以大规模进行, 加卸载条件比较理想, 对同一问题现实技术误差可通过数学方法进行屏蔽, 方便在理想状态下, 对一个问题进行系统研究。本文从混凝土的颗粒积聚体物理特征出发, 利用 PFC 颗粒流程序虚拟实现了单一尺度骨料和全级配混凝土数值试件, 并对其进行了单轴压缩试验, 对其破损过程进行了研究。

^{*} 收稿日期: 2008-11-25; 修订日期: 2008-04-10

基金项目: 冻土工程国家重点实验室开放课题(SKLFSE200602) 资助; 国家科技支撑计划重点课题(2006BAK30B02) 资助项目

通讯作者: 党发宁(1962—), 男, 博士, 教授, 博导。研究方向为有限元数值计算理论。E-mail: yxt9406@163.com

1 PFC 颗粒流计算理论

1.1 颗粒流方法的基本假设

颗粒流方法在模拟过程中作了如下假设:1)颗粒单元为刚性体;2)接触发生在很小的范围内,即点接触,现在也发展了面接触;3)接触特性为柔性接触,接触处允许有一定的“重叠”量;“重叠”量的大小与接触力有关,与颗粒大小相比,“重叠”量很小;4)接触处有特殊的粘接强度;5)颗粒单元为圆盘形(或球形)。

大部分变形都被解释为沿相互接触面的表面发生的运动。在颗粒流模型中,除了存在代表材料的圆盘形或球形颗粒外,还包括代表边界的“墙”。颗粒和墙之间通过相互接触处重叠产生的接触力发生作用,对于每一个颗粒都满足运动方程,而对于墙不满足运动方程,即作用于墙上的接触力不会影响墙的运动。墙的运动是通过人为给定速度,并且不受作用在其上的接触力的影响。同样,两个墙之间也不会产生接触力,所以颗粒流程序只存在颗粒—颗粒接触模型和颗粒—墙接触模型。

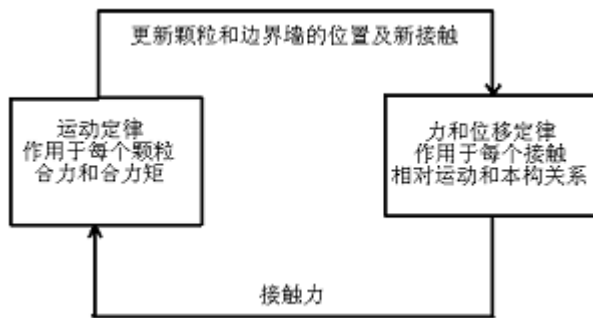


图1 PFC 计算流程(引自文献[10])

Fig. 1 Computing flow chart of PFC^[10]

平衡力矩便使该颗粒根据牛顿第二运动定律运动。运动的颗粒不是自由的,它会遇到邻接颗粒的阻力。这种位移和力的作用规律就相当于物理方程,它可以是线性的,也可以是非线性的。计算按照时步迭代并遍历整个颗粒集合,直到每个颗粒的不平衡力和不平衡力矩小于允许值为止。其计算过程见图1。

1.3 粘性阻尼

当粘性阻尼被激活时,在颗粒之间的每个接触点就增加了法向和切向阻尼器。这些阻尼器与现有的接触模型同时作用,阻尼力 D_i 就被加入到接触力中,其有法向和切向两个分量(其中 $i=n$ 表示法向分量, $i=s$ 表示切向分量),统一表达式如下:

$$D_i = C_i |V_i| = \beta_i C_i^{critical} |V_i| \quad (1)$$

式中: C_i 是阻尼常数; V_i 是接触点处相对速度,并且与阻尼力方向相反。阻尼常数不能直接指定,相反临界阻尼比 β_i 却可以指定。

$$C_i^{critical} = 2m\omega_i = 2\sqrt{mk_i}$$

$$M = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

$$k'_i = \alpha \frac{k_i}{(\sqrt{1 + \lambda_i^2} - \lambda_i)^2} \quad i = n \text{ 表示法向分量}; i = s \text{ 表示切向分量} \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{C_i}{2k_i \Delta t_0}$$

式中: ω_i 是没有阻尼系统的自然频率; k_i 表示没有粘性阻尼的接触切线刚度; α 表示安全系数; m 是系统有效质量。在球—边界墙接触中, m 被认为是球颗粒质量,而球—球接触中 m 如式中所示由两个球的质量求取; c_i 表示临界阻尼常数; Δt_0 表示没有粘性阻尼的时间步; PFC3D 中,当粘性阻尼被激活时,为了尽快达到稳定,时间不是被减小的。Belytschko 提出了一个用刚度百分比阻尼求取临界时间步的公

式。同样的公式可用于评价表观刚度 k'_i , 实际使用时可通过上式求解一个用于计算法向和切向表观刚度的最小临界时间步。

粘性阻尼的特性主要通过临界阻尼比 β 来体现。当 $\beta=1$ 时, 认为系统已经达到临界阻尼, 意味着响应以最快的速度被迟滞为零。 $\beta=1$ 还表示系统从 $\beta<1$ 的震荡响应过渡到 $\beta>1$ 的指数衰减响应。当 $\beta<1$ 时, 可认为系统处于欠阻尼状态, 即轻微阻尼; 当 $\beta>1$ 时, 可认为系统被过阻尼, 即严重阻尼。粘性阻尼模型见图 2。

1.4 平行粘接模型

平行粘接模型描述赋存于颗粒间有限范围内的胶结材料的本构关系, 可同时传递力和力矩。平行粘接可被设想为一系列作用于颗粒间以接触点为中心的接触平面上方圆形截面上均布的法向刚度与切向刚度为常数的弹簧。这些弹簧可以指定法向抗拉与抗剪强度, 可以与点接触弹簧一起使用。如果这些最大应力任何一个超过相应的粘接强度, 平行粘接就破裂。

平行粘接模型由法向刚度 k_n 、切向刚度 k_s 、法向强度 σ_c 、切向强度 τ_c 和粘接圆盘半径 R 等 5 个参数定义的。这些参数可用 PROPERTY pb_kn、pb_ks、pb_nstrength、pb_sstrength 和 pb_radius 命令指定。与平行连接相对应的总接触力和力矩表达式如下:

$$\begin{aligned}\bar{F}_i &= \bar{F}_i^n + \bar{F}_i^s \\ \bar{M}_i &= \bar{M}_i^n + \bar{M}_i^s\end{aligned}\quad (3)$$

约定力和力矩表示平行粘接作用于在颗粒 B 上的力和力矩, 如图 3 所示。可这些矢量均可被分解为相对于接触平面的切向分量和法向分量。其中法向分量矢量可被表示为:

$$\begin{aligned}\bar{F}_i^n &= (\bar{F}_j n_j) n_i = \bar{F}^n n_i \\ \bar{M}_i^n &= (\bar{M}_j n_j) n_i = \bar{M}^n n_i\end{aligned}\quad (4)$$

当粘接形成时, 力和力矩均被初始化为零, 在接触处后续一系列相对位移增量和旋度增量导致的弹性力和力矩增量均被加入力和力矩的当前值。一个时步 Δt 内产生的弹性力增量和弹性力矩增量可通过下式计算:

$$\begin{cases} \Delta \bar{F}_i^n = (-\bar{k}^n A \Delta U_i^n) n_i \\ \Delta \bar{F}_i^s = -\bar{k}^s A \Delta U_i^s \\ \Delta U_i = V_i \Delta t \end{cases}, \quad \begin{cases} \Delta \bar{M}_i^n = (-\bar{k}^s J \Delta \theta_i^n) n_i \\ \Delta \bar{M}_i^s = -\bar{k}^n I \Delta \theta_i^s \\ \Delta \theta_i = (\omega_i^{[B]} - \omega_i^{[A]}) \Delta t \end{cases}, \quad \begin{cases} A = \pi \bar{R}^2 \\ J = \frac{1}{2} \pi \bar{R}^4 \\ I = \frac{1}{4} \pi \bar{R}^4 \end{cases} \quad (5)$$

式中: A 是粘接圆盘的面积; J 是圆盘截面的极惯性矩; I 是圆盘截面围绕 $\Delta \theta_i^s$ 方向的通过接触点的轴的惯性矩。与平行粘接相关的新时刻的力和力矩矢量通过叠加过去时刻的接触位置产生的力和力矩增量实现。新的力和力矩矢量计算方法如下:

$$\begin{aligned}\bar{F}_i^n &\leftarrow \bar{F}_i^n + \Delta \bar{F}_i^n, \quad \bar{M}_i^n \leftarrow \bar{M}_i^n + \Delta \bar{M}_i^n \\ \bar{F}_i^s &= \{\bar{F}_i^s\}_{rot,2} + \Delta \bar{F}_i^s, \quad \bar{M}_i^s = \{\bar{M}_i^s\}_{rot,2} + \Delta \bar{M}_i^s\end{aligned}\quad (6)$$

式中: $rot, 2$ 表示更新。作用在粘接周边上的最大拉应力和剪应力的计算方法如下(借用梁理论):

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{-\bar{F}_i^n}{A} + \frac{|\bar{M}_i^s|}{I} \bar{R}, \text{ 如 } \sigma_{\max} \geq \bar{\sigma}_c \text{ 则粘接破裂} \\ \tau_{\max} &= \frac{\bar{F}_i^s}{A} + \frac{|\bar{M}_i^n|}{J} \bar{R}, \text{ 如 } \tau_{\max} \geq \bar{\tau}_c \text{ 则粘接破裂}\end{aligned}\quad (7)$$

如果粘接保持非接触, 则最后力和力矩矢量对于两个球颗粒力任何一个最终结果力和力矩贡献可用下式推导得到:

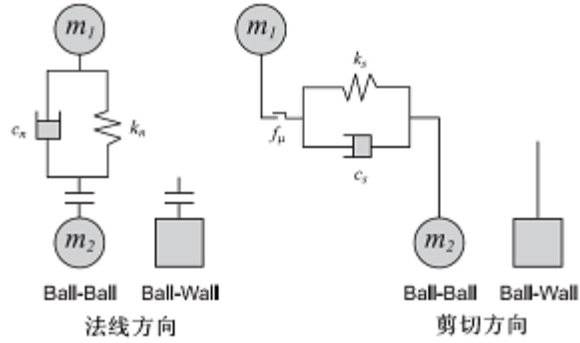


图2 粘性阻尼(单个接触)^[10]

Fig. 2 Viscous damping of PFC(single contact)^[10]

$$\begin{aligned} F_i^{[A]} &\leftarrow F_i^{[A]} - \bar{F}_i M_i^{[A]} \leftarrow M_i^{[A]} - e_{ijk} (x_j^{[C]} - x_j^{[A]}) \bar{F}_k - \bar{M}_i \\ F_i^{[B]} &\leftarrow F_i^{[B]} + \bar{F}_i M_i^{[B]} \leftarrow M_i^{[B]} + e_{ijk} (x_j^{[C]} - x_j^{[B]}) \bar{F}_k + \bar{M}_i \end{aligned} \quad (8)$$

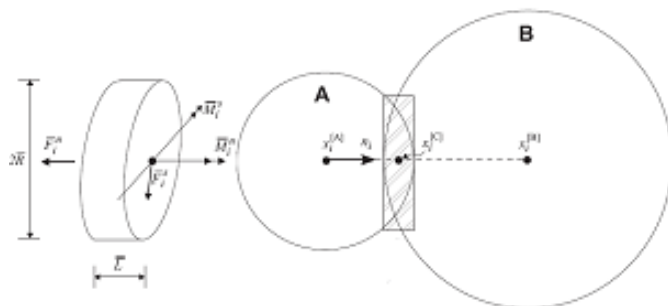


图 3 平行粘接

Fig. 3 Parallel bonding of PFC^[10]

2 数值混凝土虚拟实现

混凝土数值试件的构件是通过下列步骤实现的,首先以 0.1mm~0.5mm 颗粒在宽度 50mm,高度 150mm 范围内生成了水泥砂浆基质材料;再利用 clump 和 range 随机生成团簇用以模拟骨料及其空间随机分布,骨料强度比基质材料高 10 倍。接触本构选用平行粘结模型,模型水泥砂浆材料输入参数 pb_kn=0.65GPa, pb_ks=0.65GPa, pb_nstren=20MPa, pb_sstren=20MPa 和 pb_radius=0.25;骨料输入参数 pb_kn=6.5GPa, pb_ks=6.5GPa, pb_nstren=200MPa, pb_sstren=200MPa 和 pb_radius=0.5。通过数值模拟形成的混凝土数值试件见图 4。

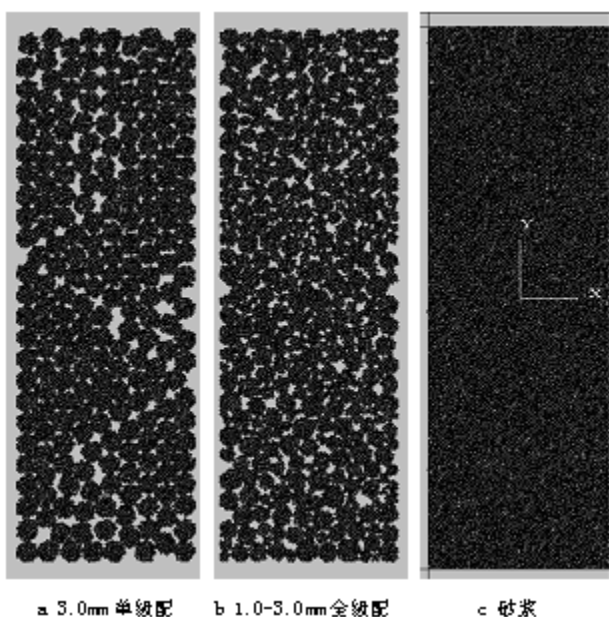


图 4 混凝土数值试件

Fig. 4 Numerical sample of concrete

数值加载、边界和初始实验条件下的计算,其破坏形态分别整理成图 5。为了显示清楚,第一张为单独骨料显示,目的是观察骨料有没有破坏,或者裂纹在骨料中如何产生和扩展;第二张为隐藏骨料的,目的是为了清楚显示破坏形态。

从图 5(a)可以看出,沿着单级配混凝土破裂面的部分骨料也发生了破裂,骨料一定程度上起到了阻裂作用;全级配混凝土破裂面周围的骨料基本上破坏得很少,说明其破裂相对温和,由于骨料结构相对稳定,所以不是很剧烈,破裂多绕骨料发生。从图 5(b)可知,破裂面均呈雁行张裂,而且垂向延伸较

虚拟试验模拟了混凝土单轴压缩试验,采用顶部加载,约束底部边界,自由侧面边界,加载通过位移实现,分步进行。根据 MTS 试验机原理编写程序实现了数值实验的伺服功能。

从随机骨料的生成过程发现,开始生成较快,然后速度慢慢减缓,而且空间受到限制,单级配骨料的空间结构有缺陷,故料结构的稳定性受到影响。这会影响其力学行为。全级配则相对要好,因为大骨料中间有小骨料充填,所以稳定性要好。单级配最大投放 222 个,全级配最多投放骨料 396 个,砂浆基质,即全部颗粒 16370 个。

3 混凝土数值试验

3.1 对破坏形态的影响

在单轴压缩实验条件下,进行了相同

长较明显。这是由于骨料垂向密度和连接强度大于径向密度和连接强度,而且垂向骨料间相互约束作用,要大于径向。径向骨料的约束有限,而且最外面没有围压束缚,所以垂向阻隔作用明显大于径向,这是造成裂纹沿垂向较弱处发展,在径向张开度较大的原因。这也就说明材料中晶体的大小、位置和连接好坏均会影响强度。

3.2 对裂纹扩展的影响

分析发现,骨料的空间位置和数量、大小均会影响混凝土的力学响应,并造成其破坏形态的差异。在此,对上述数值实验加载过程中裂纹的情况进行了统计和分析,结果整理成图6。

颗粒流是一类离散元方法,裂纹就是两个颗粒间的粘结强度被破坏。拉裂纹是指破裂方向与荷载作用方向平行的情况;剪裂纹是指破裂方向与荷载作用方向垂直的情况,数量使用遍历判断的方法。从图6可知,裂纹总数曲线是随着加载过程逐步抬升的;在轴向应变小于0.015时,剪裂纹数量多于拉裂纹,随后拉裂纹多于剪裂纹,这说明起先破坏是剪切破坏,随后张开度增加是拉裂破坏,具体可见破裂形态。破坏时裂纹总数逐步增加,拉、剪裂纹也缓慢增加,上述裂纹数量均在同一量级内变化,说明破坏不剧烈。破坏模式没有本质区别,只是范围不同罢了。

3.3 对力学行为的影响

级配对于混凝土材料强度特性的变化有多大,或者会有什么规律。根据上述计算成果,对其应力应变曲线、峰值强度进行了整理和统计,结果绘成图7。

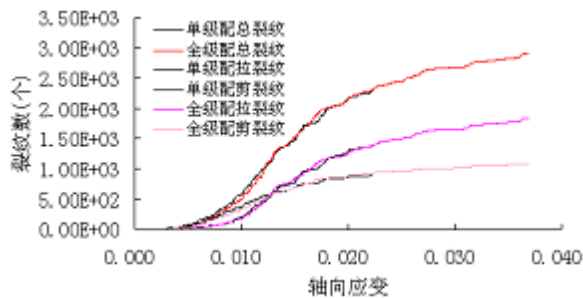


图6 单级配和全级配混凝土的裂纹扩展

Fig. 6 Fracture expansion of concrete with single size or all scale of aggregate

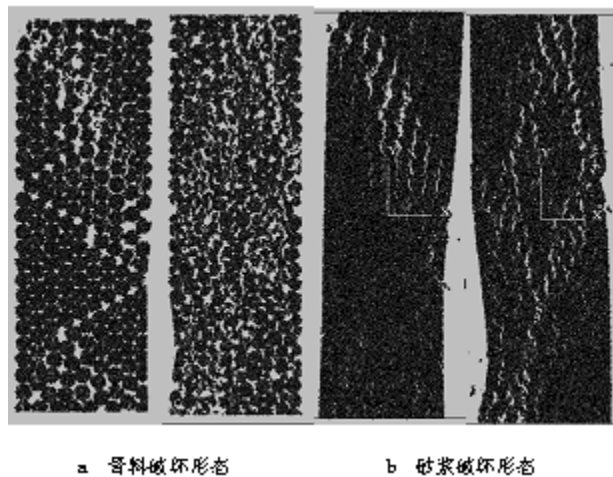


图5 数值混凝土破坏形态

Fig. 5 Rupture shape of numerical concrete

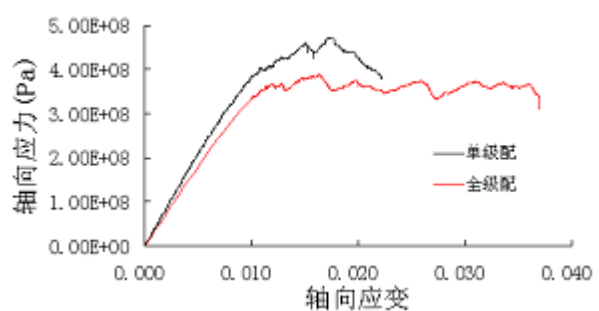


图7 混凝土数值试件的力学响应

Fig. 7 Mechanics response of numerical concrete

从图7可知,单级配混凝土的峰值强度还要高于全级配的,这与混凝土常规试验结论不相符合。这是由于3mm单级配的骨料结构,要比1mm~3mm全级配的骨料结构稳定造成的。研究本身也表明骨料的结构稳定性决定了混凝土的力学性质。由于数值试件中很难做到与3mm单级配的骨料相同数目下的全级配,而骨料大小和空间结构对混凝土的力学行为有影响,这是数值试验下一步要考虑的问题,即控制一定大小骨料的投放数量的问题。这部分内容可以通过编写fish语言来实现,需要参考颗粒分析曲线来实现级配控制。从应力应变曲线可以看出,破裂后曲线的震荡较大,这是骨料引起的,根源在于颗粒间尺寸差异。

3.4 对破坏过程能量演化的影响

要想解释骨料对混凝土破坏过程的影响机理,仅从宏观破损形态和应力应变曲线进行观察是不够的。能量转换中既包含了宏观信息,也反映了微观信息,各种能在破坏过程中的调整,有利于解释不同阶段何种因素居于主导地位,这对于工程材料性质研究很有意义。在此,追踪了数值试件破坏过程中边界能量、粘结能、摩擦能、动能和应变能。根据能量衰减规律对其破坏机理进行解读,结果整理成图 8。

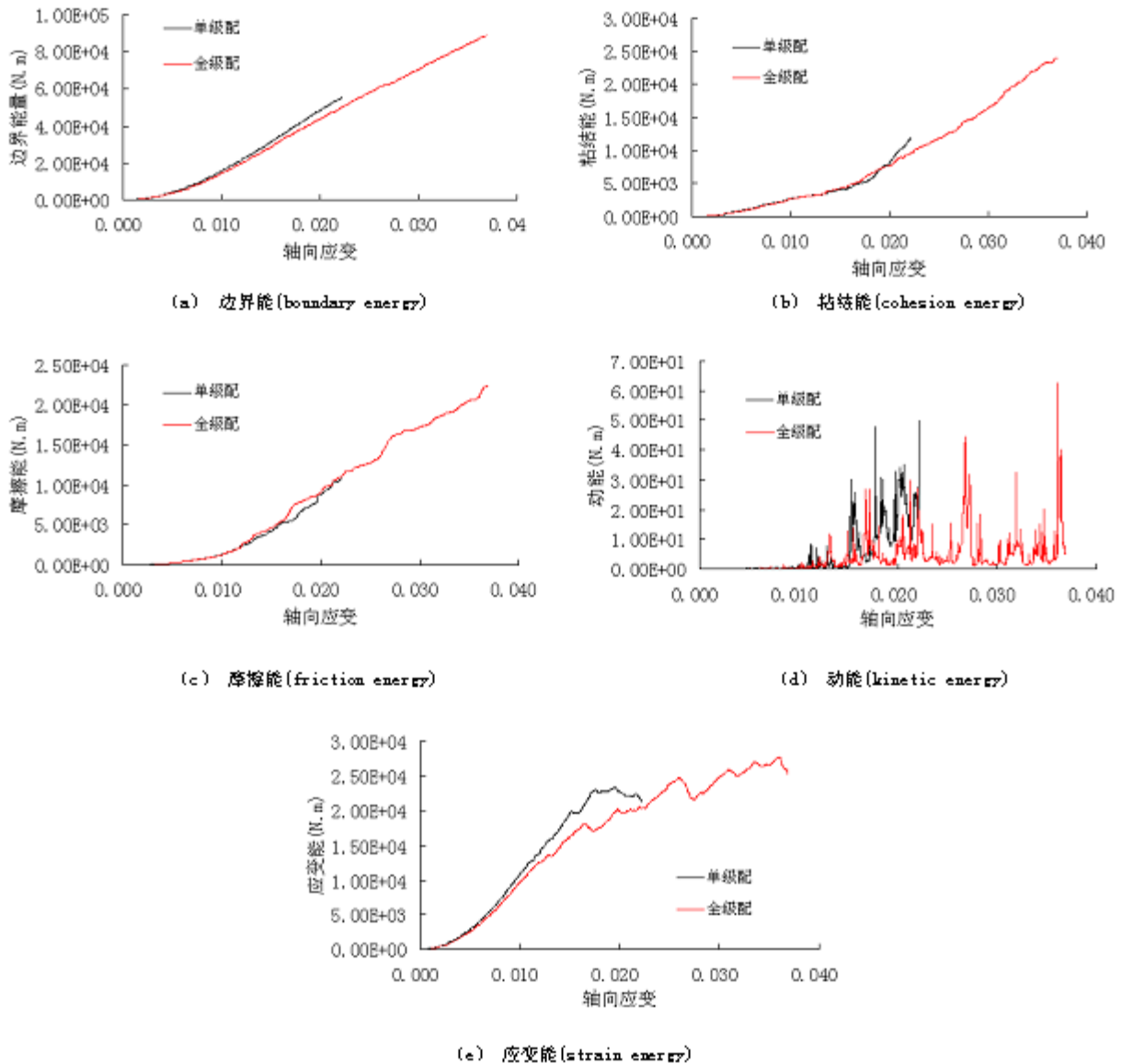


图 8 骨料对能量转化的影响

Fig. 8 Energy dissipation affected by aggregate in concrete

边界能量:是边界作用力与位移的乘积;粘结能量:是指克服粘结强度所作的功;摩擦能量:是摩擦力与位移的乘积;动能:是颗粒系统动能的和;应变能:是应力与应变的乘积。根据图 8 (a)~(c),边界能量、粘结能和摩擦能随着加载过程呈增加趋势,在轴向应变大于 0.02 后,均表现为全级配的情况大于单级配的,说明全级配的力学行为要比单级配稳定。全级配的情况破裂的更彻底,更全面,不同于单级配的局部破裂。动能衰减过程伴随有好几个脉冲起伏说明破坏过程不稳定,伴随着破损的颗粒位置调整比较大,而且单级配的动能曲线要高于同条件下的全级配曲线,说明其破裂时间更短、更剧烈。从图 8(e)可知,应变能有一个积累和释放过程,单级配的积累时间短,释放快;而全级配的积累时间长,释放

慢。这说明前者破坏过程稳定性差,剧烈,这也是骨料颗粒大,颗粒间差异巨大造成的,能量波动。

4 结论与展望

经过编程实现了混凝土数值试验的虚拟实现,在该试验平台下,可很方便的实现对混凝土的力学性能、破坏形态、裂纹扩展过程和能量演化过程进行追踪和对比分析。这是常规试验中较难实现的,可利用数值试验针对混凝土的某些特性进行大量试验,有利于多方面详细分析,并总结规律。

当前研究中,尚较难模拟混凝土任意形状骨料,即难以严格虚拟建立混凝土的物理结构模型,而这对力学行为有影响,所以下一步研究的重点在于虚拟实现混凝土的骨料结构体系。

参考文献:

- [1] 彭一江,黎保琨,刘斌. 碾压混凝土细观结构力学性能的数值模拟[J]. 水利学报,2001,11(6):19—22 (PENG Yi-jiang, LI Bao-kun, LIU Bin. Numerical simulation of meso-level mechanical properties of roller compacted concrete [J]. Shuili Xuebao,2001,11(6):19—22 (in Chinese))
- [2] 徐菁,吴子燕. 混凝土材料细观结构断裂数值模拟[J]. 西北工业大学学报,2003,21(5):556—559 (XU Jing, WU Zi-yan. On predicting fracture strength of concrete[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2003,21(5):556—559 (in Chinese))
- [3] 马怀发,陈厚群,黎保琨. 混凝土试件细观结构的数值模拟[J]. 水利学报,2004,10:27—35 (MA Huai-fa, CHENG Hou-qun, LI Bao-kui. Meso-structure numerical simulation of concrete specimens[J]. Shuili Xuebao,2004,10:27—35 (in Chinese))
- [4] WANG Z M, KWAN A K H, CHAN H C. Meso-scopic study of concrete I, generation of random aggregate structures and finite element mesh[J]. Computers and Structure,1999,70:533—544.
- [5] 刘光廷,高政国. 三维凸型混凝土骨料随机投放算法[J]. 清华大学学报,2003,43(8):29—36 (LIU Guang-ting, GAO Zhen-guo. Random3-D aggregate structure for concrete [J]. Journal of Tsinghua University (Sci&Tech), 2003,43(8):29—36 (in Chinese))
- [6] Bazant Z P, Tabbara M R, Kazemi M T, et al. Random particle model for fracture of aggregate or fiber composites [J]. Engrg Mesh ASCE. 1990,116:1686—1705.
- [7] Cundall P A, Strack O D L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies[J]. Géotechnique, 1979,29: 47—65.
- [8] Bazant Z P, Chen E P. Scaling of structural failure[J]. Appl Mech Rev,1997,50(10):593—627.
- [9] Xu Jing, Wu Ziyang. On Predicting Fracture Strength of Concrete[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2003, 21(5):556—559.
- [10] Itasca Consulting Group, Inc. PFC (Particle Flow Code), Version 3.0. Minneapolis:ICG, 2004.
- [11] Ratigan J L. The use of fracture reopening pressure in hydraulic fracturing stress measurements[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1992;25:225—36.
- [12] Hazzard J F, Young R P. Simulating acoustic emissions in bonded-particle models of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37:867—72.
- [13] Potyondy D O, Cundall P A, Lee C. Modelling of rock using bonded assemblies of circular particles[M]// Aubertin M, editor. Holt R M, Brandshaug T, Cundall P A. Discrete particle and laboratory modelling of core mechanics. In: Pacic Rocks 2000. Rotterdam; Balkema, 2000:1217—1224.

Numerical Test Study of Concrete Material Based on Particle Flow

XU Shang-jie^{1,2}, YIN Xiao-tao³, MA Shuang-ke⁴, DANG Fa-ning¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Shaanxi 710048, China; 2. Shandong Provincial Institute of Water Resources, Ji'nan 250013, China; 3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China; 4. Xi'an Research Institute of Highway, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Concrete is a typical heterogeneous material, whose mechanical behaviour and rupture process are very complex. An inner embedded language of PFC particle flow software, fish, was used to compile a program aiming at the making of random concrete aggregate and the boundary condition control to simulate MTS servo function. Based on above program, virtual numerical uniaxial compression experiment of concrete was implemented. Relative to the aggregate put in concrete specimen in common used finite element method, aggregate referred in this paper can be split into pieces, which is superior to the traditional digital concrete. Moreover, based on the making of digital specimen, numerical uniaxial concrete compression test with single grading matching and all grading matching was designed, the rupture shape, fracture propagation, stress and strain curves and energy dissipation process during concrete material breakage under virtual uniaxial compression experimental condition were observed. It is found that static or dynamic features of concrete can be systematically studied by means of this virtual experimental platform.

Keywords: particle flow; concrete; aggregate; rupture process; numerical experiment