

引用格式:李守巨,王颂,王志云. 基于巴西劈裂试验的混凝土细观本构模型参数估计方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2018, 37(4):49-57.

LI Shouju, WANG Song, WANG Zhiyun. Microparameter estimation method of concrete micro-constitutive model based on Brazilian test[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2018, 37(4):49-57.

基于巴西劈裂试验的混凝土细观本构模型参数估计方法

李守巨¹,王 颂¹,王志云²

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室,辽宁 大连 116024;

2. 大连海洋大学 海洋与土木工程学院,辽宁 大连 116023)

摘要:通过力学性能试验确定细观参数取值是离散单元法进一步应用的关键问题。选取5个控制材料宏观响应的细观本构模型参数,建立混凝土材料巴西劈裂试件二维颗粒流程序(particle flow code in two-dimensions, PFC^{2D})计算模型,提出了一种细观参数的估计方法。假定试样的宏观响应与细观参数间为近似线性关系。根据已有研究成果,给出一组细观参数的初始值,利用线性回归得到细观参数对宏观响应的回归系数,建立细观参数与宏观响应的映射关系。定义目标函数为宏观响应的计算值与试验观测值的均方差最小,求解一个约束优化问题,得到细观参数的估计值。以C35混凝土巴西劈裂试验为例进行了模拟,结果表明根据估计的细观参数模拟得到的荷载-位移曲线与实际试验曲线吻合较好,验证了方法的有效性。

关键词:混凝土;巴西劈裂试验;离散单元法;颗粒流程序;细观参数

中图分类号:U451⁺.4

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2018)04-0049-09

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.04.006

Microparameter Estimation Method of Concrete Micro-constitutive Model Based on Brazilian Test

LI Shouju¹, WANG Song¹, WANG Zhiyun²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. College of Ocean and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: The determination of microparameters through mechanical tests is the key problem to the further application of discrete element method. In this paper, a particle flow code in two-dimensions (PFC^{2D}) simulation model of concrete Brazilian test specimen was established by selecting five microparameters of the concrete micro-constitutive model which could control the macroscopic response of the specimen, and a microparameter estimation method was proposed. With the assumption that the macroscopic response of the specimen has an approximate linear relationship with the five microparameters, the mapping relationship between microparameters and macroscopic response was established by giving a set of initial values of microparameters and by obtaining the regression coefficients of microparameters to macroscopic response based on the existing research. The objective function was defined as the minimum

收稿日期:2017-03-31

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2015CB057804);国家自然科学基金项目(11572079);工业装备结构分析国家重点实验室开放基金项目(S14206)

作者简介:李守巨(1960—),男,辽宁辽中人,教授,博士,主要从事岩石力学与参数反演研究. E-mail: lishouju@dlut.edu.cn

of mean square deviation of the calculated and observed values of macroscopic response, and the estimated values of microparameters are obtained by solving a constrained optimization problem. With the Brazilian test of C35 concrete as an example, the estimated parameters were simulated. The result shows that the load-displacement curve of Brazilian test and that of PFC^{2D} simulation agree perfectly, which validates the effectiveness of the method proposed.

Key words: concrete; Brazilian test; discrete element method; PFC^{2D}; microparameter

混凝土材料通常指由水泥为胶凝材料,砂、石作骨料,与水(可含外加剂和掺合料)按一定比例配合,经搅拌而得的水泥混凝土。在土木工程结构中,混凝土材料得到了大量的应用,其抗拉能力比抗压能力弱很多,然而在一些极端情况下,混凝土材料可能会承受较大的拉力而引起结构破坏。巴西劈裂试验是测定岩石类材料抗拉强度的方法之一,也是国际岩石力学学会(international society for rock mechanics, ISRM)^[1]和美国材料试验学会(american society for testing and materials, ASTM)^[2]推荐的测量岩石材料抗压强度的试验方法。由于混凝土与岩石力学性能相近,有许多学者利用巴西劈裂试验测量混凝土的抗拉强度^[3-6]。Cundall 和 Strack 于 20 世纪 70 年代基于牛顿第二定律提出了离散单元法(discrete element method, DEM)的概念。相比基于连续介质力学的有限单元法,离散单元法对于模拟混凝土的开裂、裂纹扩展等大变形有一定的优势。Qin 等^[7]基于质点单元法,建立了不同应变率下混凝土骨料、砂浆和界面三相细观动力学模型,研究表明应变率越高,网状裂纹产生的越多,试样的力链产生更多分支,意味着在更高的应变率下需要更多的能量达到失效。Ghazvinian 等^[8]用 PFC^{2D}模拟了含非贯通节理的岩石材料的剪切特性,离散元模拟表明宏观剪切带是张拉破坏产生的微裂纹扩展引起的。Mehtcherine 等^[9]介绍了用离散单元法模拟混凝土流动领域的发展,给出了参数估计的各种例子并与试验结果进行了比较,显示出离散单元法的潜力。Pan 等^[10]用 PFC^{2D}建立了混凝土三相细观模型,进行了单轴压缩试验来研究碱集料反应对混凝土力学性能的影响,结果表明这一模型可以有效预测碱集料反应引起的混凝土内部微裂纹的扩展。Kazerani 等^[11]提出了一个检验岩石强度和失效的离散元模型,两个相邻颗粒的边界被视为柔性接触,其本构关系控制材料的断裂性能,基于单轴/三轴压缩和巴西劈裂试验提出一套细观参数并对比试验结果验证了方法的有效性。

离散元单元法与有限单元法相比,最大的区别是不可能通过直接赋值的形式实现对材料的宏观基本物理力学参数的确定,仅取决于颗粒的细观本构模型参数。离散元只可以直接赋值颗粒的几何特征(颗粒大小和分布)和颗粒间接触的细观力学参数(细观本构模型和刚度、摩擦系数等接触力学特征),这些细观参数的改变意味着材料的宏观力学特性的显著改变。而如何定量确定混凝土材料离散元模型的细观参数是制约该方法进一步深入研究和工程实际应用的瓶颈问题之一。混凝土骨料粒径经常是毫米量级的,在该尺度上直接测量其细观参数是极其困难的,通用的方法是试错法(hit-and-miss),即不断调整细观参数反复计算直到获得一组与宏观响应吻合较好的细观参数。然而这样的方法往往存在着参数调整缺乏方向性和目的性等问题,造成效率低下。本研究提出一种基于巴西劈裂试验的混凝土细观本构模型参数估计方法,即先建立试验件离散元模型,给出一组细观参数估计值,接下来分别改变每个细观参数的取值,利用线性回归确定每个细观参数对宏观变量的影响系数,进而确定试样的最大承载力及其对应的最大位移与细观参数间的关系,求解一个约束优化问题,即可求得一组计算结果与实际试验曲线较为接近的细观参数。该方法的主要优势是只使用一组试验数据并进行少量 PFC^{2D}计算,即可得到一组满足工程需求的细观参数。

1 PFC^{2D}中的细观本构模型

在某一时刻,PFC^{2D}程序根据牛顿第二定律确定颗粒的加速度,并通过差分法得到颗粒在这一时刻的位移。而将力和位移联系起来使计算能够循环进行下去的关键条件,就是细观本构模型。PFC^{2D}中常用的细观本构模型主要有三种:一是接触刚度模型,主要描述颗粒相互接触运动时法向和切向的挤压力;二是滑移模型,主要描述颗粒间存在相互滑动趋势时的力学行为;三是粘结模型,主要描述黏性颗粒的抗拉和抗剪能力。接触刚度模型中,常用的是线性接触模型,利用接触的法向刚度 K^n 和切向刚度 K^t 两个参数将颗粒间的

法向、切向力和重叠量联系起来。

$$\begin{cases} F_i^n = K^n U_n n_i \\ \Delta F_i^s = -K^s U_i^s \end{cases} \quad (1)$$

其中: F_i^n 和 ΔF_i^s 分别表示形成第 i 个接触的两个颗粒间的法向力和切向力的增量, $U_n n_i$ 和 ΔU_i^s 分别表示两个颗粒间重叠量法向分量和切向分量的增量。而接触的法向和切向刚度与组成接触的两个颗粒的法向刚度 k_n 和切向刚度 k_s 有关。

$$K^\xi = \frac{k_\xi^{[A]} k_\xi^{[B]}}{k_\xi^{[A]} + k_\xi^{[B]}} \quad (2)$$

其中: $\xi = \{n, s\}$, n, s 分别表示法向和切向。滑移模型可以表示为

$$F_{\max}^s = \mu |F_i^n| \quad (3)$$

其中 μ 表示颗粒间的摩擦系数。当颗粒间的切向力小于 F_{\max}^s 时,两颗粒保持其相对位置;当切向力大于 F_{\max}^s 时,两颗粒发生相对滑移。粘结模型分为接触粘结模型和平行粘结模型。平行粘结模型相当于两颗粒之间的一个胶结体,既可以传递力也可以传递力矩,而接触粘结模型只可以传递力而不能传递力矩。

实际混凝土材料中骨料的咬合嵌固作用和胶凝材料的胶结作用均可以传递弯矩,因此采用线性接触模型、滑移模型和平行粘结模型来模拟混凝土材料。定义平行粘结模型所需的参数有 4 个,分别是胶结体法向刚度 \bar{k}_n 、切向刚度 \bar{k}_s 、法向强度 $\bar{\sigma}_c$ 和切向强度 $\bar{\tau}_c$ 。这样利用 PFC^{2D} 进行混凝土材料模拟所需要确定的细观参数有 7 个, $X = \{k_n, k_s, \mu, \bar{k}_n, \bar{k}_s, \bar{\sigma}_c, \bar{\tau}_c\}$ 。

对于 PFC^{2D} 中的接触刚度模型和平行粘结模型,都可以视为两颗粒及连接其圆心的弹性梁组成的系统^[12]。设弹性梁的弹性模量为 E_c (接触弹性模量),由弹性力学解可得

$$k_n = 2 E_c t \quad (4)$$

其中: t 为颗粒厚度。这样就可以用 E_c 表示 k_n ,同时需要引入另一个参数 k_n/k_s 。同理,对平行粘结模型中的弹性梁,设其弹性模量为 \bar{E}_c ,为简化参数估计过程,可近似认为 $E_c = \bar{E}_c$ ^[12]。这样一来,需要确定的细观参数减少为 5 个,即 $X = \{E_c, k_n/k_s, \mu, \bar{\sigma}_c, \bar{\tau}_c\}$ 。由式(4)可以看出,接触处的弹性模量与颗粒的尺寸相关。对于不同颗粒构建的模型,赋予统一的接触弹性模量比赋予统一的颗粒刚度能使材料在宏观上更趋于各向同性,更加符合混凝土材料的实际情况。

对于混凝土材料而言,目前并没有明确的标准规定采用哪些细观本构模型来进行计算,表 1 列出的是不同学者研究混凝土问题时所采用的细观模型参数。

表 1 某些材料的细观本构模型参数取值

Tab. 1 Microparameters of micro-constitutive model for some materials

序号	材料	参数取值
1	土体 ^[13]	$k_n = k_s = 10^7$ N/m, $\mu = 0.7$, $n_bond = s_bond = 10^3$ N
2	沙土 ^[13]	$k_n = k_s = 8 \times 10^8$ N/m, $\mu = 0.7$
3	土石混合物 ^[13]	$k_n = k_s = 10^8$ N/m, $\mu = 1.0$, $n_bond = s_bond = 2 \times 10^5$ N
4	沥青混凝土 ^[13]	$k_n = k_s = 5 \times 10^8$ N/m, $\mu = 0.4$, $n_bond = s_bond = 4.5 \times 10^6$ N
5	混凝土 ^[14]	$k_n = k_s = 5 \times 10^{10}$ N/m, $\mu = 0.25$
6	植生混凝土 ^[15]	$E_c = 0.04$ GPa, $\mu = 0.7$, $\bar{\sigma}_c = \bar{\tau}_c = 200 \pm 150$ MPa

注: n_bond 和 s_bond 分别为接触粘结模型抗拉和抗剪强度

2 混凝土细观本构模型参数估计方法

巴西劈裂试验主要用来测试岩石材料的抗拉强度,通常是根椐弹性力学解由试样的最大承载力求得其抗拉强度。试样在破坏前处于弹性变形阶段,其荷载-位移曲线呈一近似直线。本研究主要目的是寻找一组

合适的细观参数使仿真得到的试样宏观力学响应与试验结果吻合,因此重点关注试样的最大承载力 F_{\max} 和其对应的最大位移 d_{\max} 。宏观响应与细观参数之间存在着一定的函数关系,通常情况下,这些函数关系难以显式表达出来,因此也就无法直接利用宏观响应确定细观参数取值。为简化这些函数关系,假定宏观响应是细观参数的线性叠加,且不同细观参数之间不存在耦合,即:

$$F_{\max} = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i X_i, \tag{5}$$

$$d_{\max} = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i X_i. \tag{6}$$

其中: X_i 表示细观参数, a_i 和 b_i 表示线性回归系数, a_0 和 b_0 为待定常数。为进行细观参数的估计,先给定一组细观参数初始值,对每一个细观参数,在其他参数取值不变的情况下,单独改变该参数的取值。分别取 $X = \{\dots, X_i, \dots\}$, $X = \{\dots, X_i \pm \Delta X_i, \dots\}$ 和 $X = \{\dots, X_i \pm 2\Delta X_i, \dots\}$ 5 组细观参数进行 PFC^{2D} 模拟,得到 5 个与 X_i 不同取值对应的 F_{\max} 的值。以 X_i 为自变量对 F_{\max} 进行线性回归,得到回归直线方程和相关系数 R^2 , 回归直线的斜率即为 X_i 对 F_{\max} 的线性回归系数 a_i 。同理求出细观参数对 d_{\max} 的线性回归系数 b_i 。此外,通常认为相关系数 $R^2 \geq 0.7$ 时,两变量具有相关性。基于这一考虑,当某一细观参数对 F_{\max} 或 d_{\max} 的相关系数 $R^2 < 0.7$ 时,认为其对应的线性回归系数 a_i 或 b_i 为 0,即这一细观参数的取值变化对最大承载力 F_{\max} 或其对应的最大位移 d_{\max} 没有影响。将 a_i 和 b_i 与对应的细观参数初始值相乘,所得结果与模拟得到的宏观响应之差即为待定常数 a_0 和 b_0 。

对于混凝土材料而言,不同强度的混凝土摩擦系数是不同的,这一参数是材料的固有属性,不应随意取值,而应该通过直剪试验获得。青岛地铁施工过程中采用将直剪试验和抗压试验相结合的方法对不同强度的混凝土进行了剪切试验^[16],确定了不同强度混凝土内摩擦角和内聚力的值。因此在参数估计的过程中,通过查阅文献获得摩擦系数的取值作为已知值参与计算。此时,混凝土材料模拟需要确定的细观参数还剩 4 个, $X = \{E_c, k_n/k_s, \bar{\sigma}_c, \bar{\tau}_c\}$ 。为进行参数估计,定义目标函数为试样宏观响应计算值与试验观测值的均方差^[17]

$$\min J = \sqrt{\frac{1}{2} \{ [F_{\max}(X) - \bar{F}_{\max}]^2 + [d_{\max}(X) - \bar{d}_{\max}]^2 \}}. \tag{7}$$

其中: J 为目标函数, $F_{\max}(X)$ 和 $d_{\max}(X)$ 为根据式(5)、(6)得到的宏观响应计算值, \bar{F}_{\max} 和 \bar{d}_{\max} 为宏观响应试验观测值。细观参数 X_i 的取值不应超出 $X_i \pm 2\Delta X_i$ 这一范围,否则目标函数可能发生变化,所以问题的约束条件为 $X_i \in [X_i - 2\Delta X_i, X_i + 2\Delta X_i]$ 。求解这一优化问题,可得到一组细观参数估计值。

3 算例分析

翟越等^[18]对 C35 商品混凝土试件进行了巴西劈裂试验,试样厚度 50 mm,直径 100 mm。在 PFC^{2D} 中建立这一试样的离散元模型(如图 1),试样共由 1 078 个颗粒组成,颗粒半径在 1.0 ~ 2.0 mm 内均匀分布,颗粒厚度为 50 mm,利用刚性墙对试样施加荷载。根据文献[14-15],表 2 给出了细观参数的初始值。

为获取一组细观参数估计值,按照第 2 节所述的方法,改变细观参数的取值,进行 PFC^{2D} 模拟。图 2~6 展示了 $X = \{E_c, k_n/k_s, \mu, \bar{\sigma}_c, \bar{\tau}_c\}$ 5 个参数中任意一个参数改变时荷载-位移曲线的变化趋势。

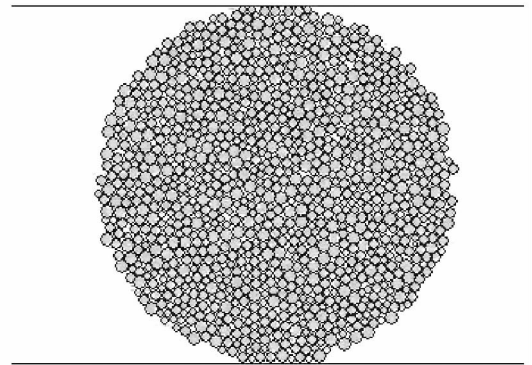


图 1 巴西劈裂试验 PFC^{2D} 模型
Fig. 1 PFC^{2D} model of Brazilian test

表 2 C35 混凝土细观参数的初始值

Tab. 2 Initial estimation of C35 concrete microparameters

细观参数	E_c/GPa	k_n/k_s	μ	$\bar{\sigma}_c/\text{MPa}$	$\bar{\tau}_c/\text{MPa}$
初始值	9	1.0	1.0	200	300

由图 2 可以看出,随着接触弹性模量 E_c 的增大,试样的最大承载力呈减小趋势,最大承载力对应的最大位移也逐渐减小。由图 3 可以看出 k_n/k_s 取值的改变主要影响试样最大承载力对应的最大位移,最大位移随 k_n/k_s 的增大而增大。 k_n/k_s 取值的改变对最大承载力的影响并无明显规律。

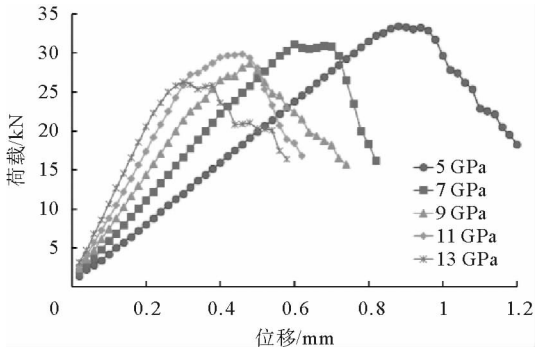


图 2 E_c 对荷载-位移曲线的影响

Fig. 2 Influence of E_c on load-displacement curves

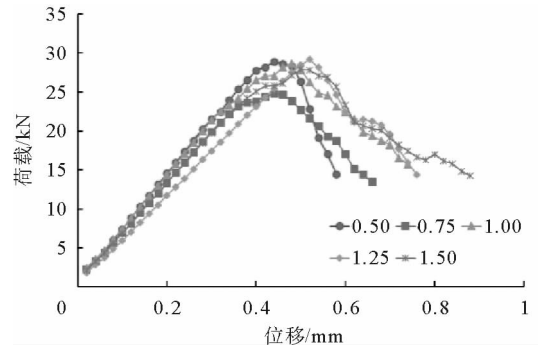


图 3 k_n/k_s 对荷载-位移曲线的影响

Fig. 3 Influence of k_n/k_s on load-displacement curves

由图 4 可以看出,随着摩擦系数 μ 的增大,试样的最大承载力也逐渐增大,最大承载力对应的最大位移呈减小趋势。摩擦系数的增大,限制了颗粒间滑移的发生,从而提高了承载力,减小了最大位移。

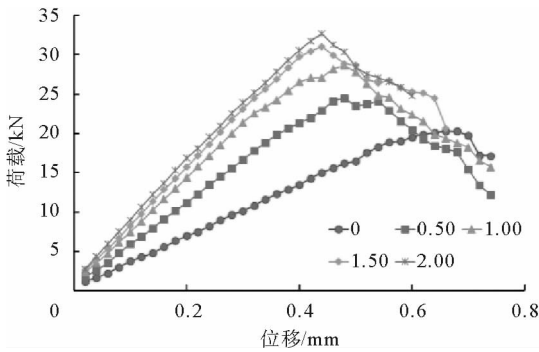


图 4 μ 对荷载-位移曲线的影响

Fig. 4 Influence of μ on load-displacement curves

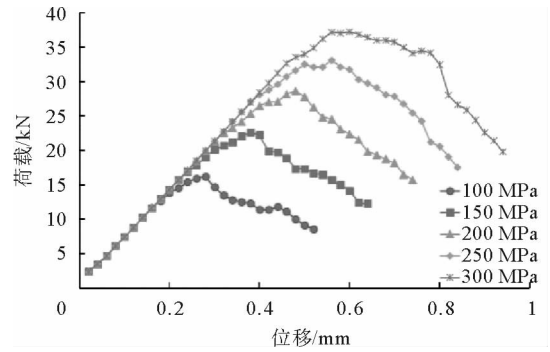


图 5 $\bar{\sigma}_c$ 对荷载-位移曲线的影响

Fig. 5 Influence of $\bar{\sigma}_c$ on load-displacement curves

图 5 和图 6 展示的是平行粘结模型胶结体的法向强度 $\bar{\sigma}_c$ 和切向强度 $\bar{\tau}_c$ 取值变化时模拟得到的结果。可以看出,各条曲线初始部分完全重合,表明两个参数对荷载-位移曲线的斜率没有影响。随 $\bar{\sigma}_c$ 和 $\bar{\tau}_c$ 增大,试样最大承载力及其对应的最大位移都增大。值得注意的是,当 $\bar{\sigma}_c = 200 \text{ MPa}$, $\bar{\tau}_c = 350 \text{ MPa}$ 以及 $\bar{\tau}_c = 400 \text{ MPa}$ 时,模拟所得的两条曲线完全重合,表明当切向强度与法向强度之差超过一定数值时,试样的破坏过程不再受切向强度 $\bar{\tau}_c$ 这一细观参数的控制。出现这一现象的原因为:巴西劈裂试验试样以受拉破坏为主^[19],受拉破坏在细观上表现为平行粘结模型胶结体所受到的法向应力大于其法向强度而破坏,但在这一破坏过程中不可避免地伴随着少量胶结体的剪切破坏。当 $\bar{\tau}_c$ 与 $\bar{\sigma}_c$ 之差大于某临界值时,在试验过程中,试

样中所有的胶结体在任意时刻所受的剪切应力均小于其切向强度,试样中所有破坏均为受拉破坏,从而导致试样的破坏过程不再受切向强度取值的影响。

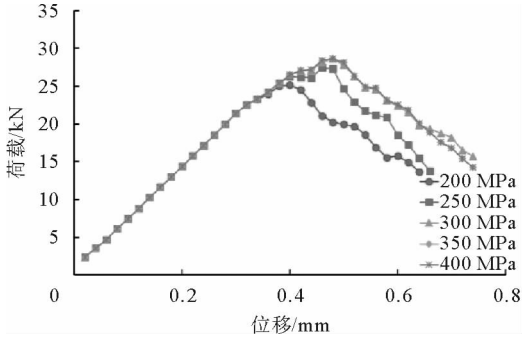


图6 $\bar{\tau}_c$ 对荷载-位移曲线的影响

Fig. 6 Influence of $\bar{\tau}_c$ on load-displacement curves

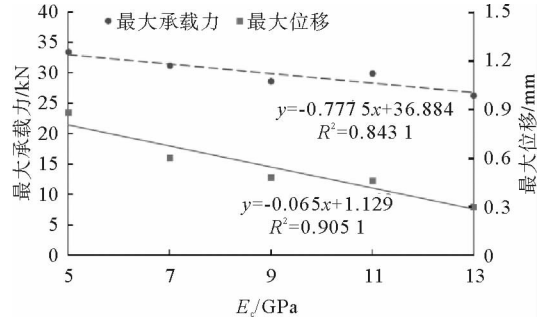


图7 宏观响应随 E_c 的变化

Fig. 7 Variation of macroscopic response versus E_c

根据图2~6所获得的信息,绘制不同细观参数对应的最大承载力和最大位移散点图(图7~11)。以各个细观参数为自变量对最大承载力和最大位移进行线性回归,得到回归直线方程和相关系数 R^2 也显示于图7~11中。

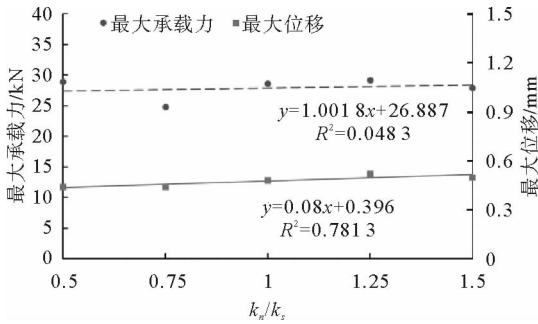


图8 宏观响应随 k_n/k_s 的变化

Fig. 8 Variation of macroscopic response versus k_n/k_s

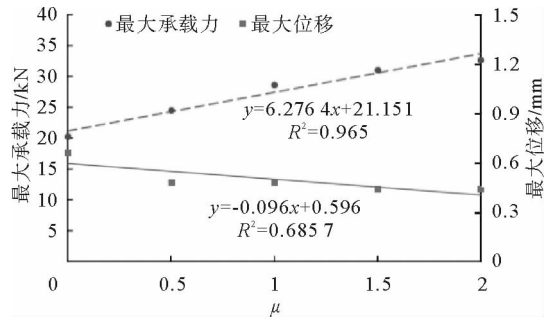


图9 宏观响应随 μ 的变化

Fig. 9 Variation of macroscopic response versus μ

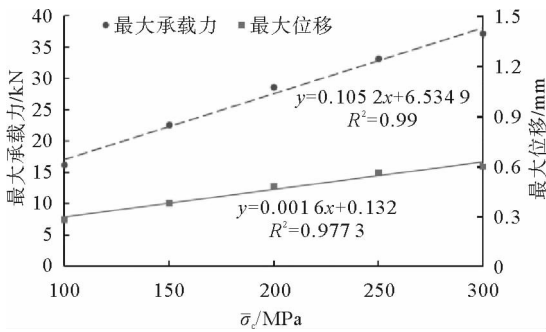


图10 宏观响应随 $\bar{\sigma}_c$ 的变化

Fig. 10 Variation of macroscopic response versus $\bar{\sigma}_c$

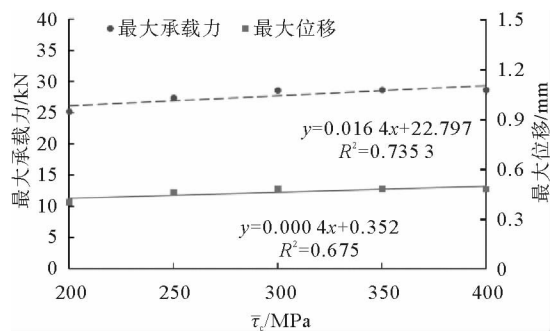


图11 宏观响应随 $\bar{\tau}_c$ 的变化

Fig. 11 Variation of macroscopic response versus $\bar{\tau}_c$

表3中列出的是根据图7~11中的回归直线方程和相关系数确定的各细观参数的线性回归系数。将表2中C35混凝土细观参数初始估计值及表3中相应的线性回归系数分别代入式(5)~(6),即可计算得到待定常数 a_i 和 b_i ,从而得到宏观响应与细观参数近似的定量关系(式(8)~(9))。

表 3 细观参数对宏观响应的线性回归系数

Tab. 3 Linear regression coefficients of microparameters to macroscopic response

i	1	2	3	4	5
a_i	-0.778	0	6.276	0.105	0.016 4
b_i	-0.065	0.08	0	0.001 6	0

$$F_{\max} = -0.778 E_c + 6.276\mu + 0.105 \bar{\sigma}_c + 0.016 4 \bar{\tau}_c + 3.41, \quad (8)$$

$$d_{\max} = -0.065 E_c + 0.08 k_n / k_s + 0.001 6 \bar{\sigma}_c + 0.657. \quad (9)$$

需要注意的是上述关系式仅仅是在给定试样尺寸和 PFC^{2D} 颗粒粒径区间后的等效近似关系,当试样尺寸或颗粒组成变化时,必须重新改变细观参数进行模拟,以得到在新的条件下各细观参数的线性回归系数。查阅文献[16]可知,C35 混凝土内摩擦角约为 51.2°,对应的摩擦系数 $\mu = 1.24$,将其代入式(8),并按照式(7)构造约束优化问题。此外,由图 6 可知,切向强度与法向强度之差不应过大,为保证解的唯一性,增加约束条件: $-\bar{\sigma}_c + \bar{\tau}_c \geq 100$ 。求解这一优化问题,所得 C35 混凝土细观参数估计值列于表 4。

表 4 C35 混凝土细观参数的估计值

Tab. 4 Estimated values of C35 concrete microparameters

细观参数	E_c/GPa	k_n/k_s	μ	$\bar{\sigma}_c/\text{MPa}$	$\bar{\tau}_c/\text{MPa}$
初始值	5.75	1.17	1.0	160.74	225.42

图 12 是使用细观参数初始值和估计值进行 PFC^{2D} 模拟所得荷载-位移曲线与试验结果的对比,通过模拟得到的两条曲线与试验曲线的相关系数分别为 $R^2 = 0.767, R^2 = 0.978$,可以看出,使用估计值模拟得到的结果更加接近试验曲线。但这一曲线在接近峰值承载力时出现下降然后略有上升的现象,这是由于与压板接触处的颗粒因应力集中而提前破坏后进一步压实所产生的。试样断裂面及 PFC^{2D} 模拟裂纹分布情况分别如图 13 (a)、(b)所示,图 13(b)中深黑色表示颗粒间胶结体拉伸破坏,灰色表示胶结体剪切破坏。

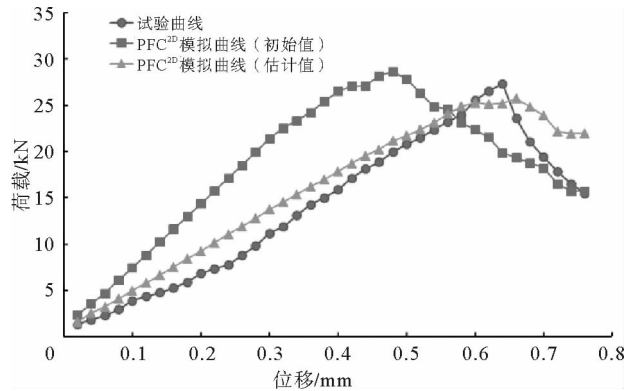
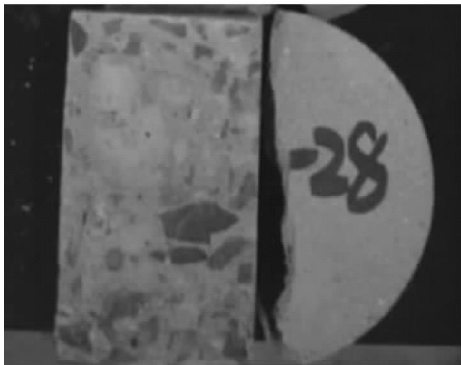
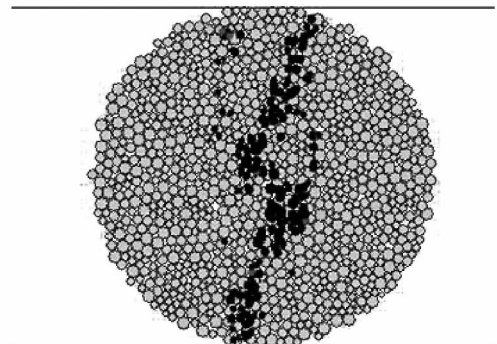


图 12 PFC^{2D} 模拟与试验荷载-位移曲线对比

Fig. 12 Comparison of load-displacement curves between PFC^{2D} simulation and experiment



(a) 试样断裂面



(b) 模拟裂纹分布

图 13 试验^[18]与 PFC^{2D}模拟裂纹分布情况对比

Fig. 13 Comparison of crack distributions between test observation and PFC^{2D} simulation

表 5 给出的是使用细观参数初始值和估计值进行模拟与试验曲线在不同位移处所得相对误差的对比。可以看出,使用经过优化之后的细观参数估计值计算得到的结果误差明显小于使用初始值得到的结果。

表 5 使用不同参数在各个位移处的误差对比
Tab. 5 Comparison of errors at each displacement using different parameters

位移/mm	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
初始值相对误差/%	92.44	110.08	91.40	67.02	33.73	12.36
估计值相对误差/%	28.23	34.87	23.00	12.57	4.39	1.14

由图 12~13 和表 5 可以看出,使用表 4 中的细观参数估计值,可以有效地模拟出混凝土试件在巴西劈裂试验中的力学行为和破坏过程,模拟曲线与试验曲线在整体变化趋势上一致,最大承载力及其对应的最大位移与试验结果比较接近。

4 结论

1) 离散元单元法的原理决定了只可以对颗粒的细观参数进行赋值,如何使细观参数计算结果与宏观试验结果吻合对 PFC 方法的应用是极其重要的。基于混凝土试样的巴西劈裂试验,提出了使用一组试验数据并进行少量 PFC^{2D} 计算以得到一组满足工程需求的细观参数的方法,避免了试错法进行参数调整的盲目性,节约了参数估计的时间。

2) PFC^{2D} 混凝土试样的最大承载力与 E_c 和 μ 相关,最大承载力随着 E_c 的增大而减小,随着 μ 的增大而增大;试验最大承载力所对应的最大位移与 E_c 和 k_n/k_s 相关,最大位移随着 E_c 的增大而减小,随着 k_n/k_s 的增大而增大;试验荷载-位移曲线的斜率也与 E_c 和 μ 相关,斜率随着二者的增大而增大。

3) $\bar{\sigma}_c$ 和 $\bar{\tau}_c$ 的变化对荷载-位移曲线的斜率没有影响,试样最大承载力及其对应的最大位移都随着 $\bar{\sigma}_c$ 和 $\bar{\tau}_c$ 的增大而增大。当切向强度与法向强度之差超过一定数值时,试样的破坏过程不再受切向强度 $\bar{\tau}_c$ 这一细观参数的控制。

4) 利用本研究提出的细观参数估计方法,得到了 C35 混凝土试件离散元细观参数,PFC^{2D} 模拟结果表明,模拟曲线与试验曲线吻合较好,两者相关系数 R^2 为 0.978,验证了该方法的有效性。

参考文献:

[1]BIENIAWSKI Z T, HAWKES I. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts,1978,15:99-103.

[2]ASTM C496-85. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens[S]. Annual Book of ASTM Standards 4,1986:337-342.

[3]CHEN X D, GE L M, ZHOU J K, et al. Dynamic Brazilian test of concrete using split Hopkinson pressure bar[J]. Materials and Structures,2017,50(1):1-15.

[4]CARMONA S, AGUADO A. New model for the indirect determination of the tensile stress-strain curve of concrete by means of the Brazilian test[J]. Materials and Structures,2012,45(10):1473-1485.

[5]OHTSU M, KAWASAKI Y. AE-SIGMA analysis in Brazilian test and accelerated corrosion test of concrete[J]. Journal of Acoustic Emission,2010,28:204-214.

[6]ABRISHAMBAF A, BARROS J, CUNHA V. Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels[J]. Cement & Concrete Research,2013,51(9):57-66.

[7]QIN C, ZHANG C H. Numerical study of dynamic behavior of concrete by meso-scale particle element modeling[J]. International Journal of Impact Engineering,2011,38(12):1011-1021.

[8]GHAZVINIAN A, SARFARAZI V, SCHUBERT W, et al. A study of the failure mechanism of planar non-persistent open joints using PFC^{2D}[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2012,45(5):677-693.

[9]MECHTCHERINE V, GRAM A, KRENZER K, et al. Simulation of fresh concrete flow using discrete element method

- (DEM): Theory and applications[J]. *Materials and Structures*, 2014, 47(4): 615-630.
- [10] PAN J W, FENG Y T, JIN F, et al. Meso-scale particle modeling of concrete deterioration caused by alkali-aggregate reaction[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, 37(16): 2690-2705.
- [11] KAZERANI T, YANG Z Y, ZHAO J. A discrete element model for predicting shear strength and degradation of rock joint by using compressive and tensile test data[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(5): 695-709.
- [12] ITASCA Consulting Group Incorporated. Particle flow in two-dimensions version 3. 1 user manual[M]. Minneapolis: ITASCA Consulting Group Incorporated, 2005.
- [13] 张宁. 碾压混凝土碾压特性的三维离散元数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [14] 张正珺, 刘军, 胡文, 等. 混凝土材料破坏过程的二维离散元模拟[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(5): 22-27.
ZHANG Zhengjun, LIU Jun, HU Wen, et al. Two-dimensional simulation of concrete material fracturing by discrete element method[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(5): 22-27.
- [15] 唐阳, 陶承品, 徐霖玉, 等. 基于 PFC^{2D} 的植生混凝土虚拟试验研究[J]. *水利科技与经济*, 2012, 20(12): 10-13.
TANG Yang, TAO Chengpin, XU Linyu, et al. Research on virtual tests of green-growing concrete based on PFC^{2D} [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2012, 20(12): 10-13.
- [16] 丛宇. 卸荷条件下演示破坏宏观机理与地下工程设计计算方法研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
- [17] 李守巨, 李德, 于申. 基于宏观实验数据的堆石料细观本构模型参数反演[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(5): 20-26.
LI Shouju, LI De, YU Shen. Meso-parameter inversion of constitutive model for rockfill materials based on marco experimental data[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2015, 34(5): 20-26.
- [18] 翟越, 赵均海, 艾晓芹, 等. 基于统一强度理论的巴西圆盘劈裂强度分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2015, 32(3): 46-51.
ZHAI Yue, ZHAO Junhai, AI Xiaoqin, et al. Analysis on splitting of Brazilian disc based on unified strength theory[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2015, 32(3): 46-51.
- [19] 刘运思, 傅鹤林, 饶军应, 等. 不同层理方位影响下板岩各向异性巴西圆盘劈裂试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(4): 785-791.
LIU Yungsi, FU Helin, RAO Junying, et al. Research on Brazilian disc splitting tests for anisotropy of slate under influence of different bedding orientations[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(4): 785-791.

(责任编辑: 吕海亮)