

# PFC<sup>2D</sup>模拟土体材料的细观参数标定及特征研究

高文宪

中铁三局集团第四工程有限公司

**摘要:** 采用PFC<sup>2D</sup>模拟双轴压缩试验的方法, 系统研究无黏结模型的宏细观特性影响, 分析法向刚度、细观摩擦系数对土体宏观参数的影响规律。结果表明: 应力应变曲线的峰值强度随着颗粒法向刚度不断增大而增大; 应力应变曲线形态的趋势受细观摩擦系数的影响较大, 摩擦系数与宏观内摩擦角的关系成正比关系, 摩擦系数与内摩擦角的正切值相近。

**关键词:** PFC<sup>2D</sup>; 土体材料; 参数标定; 宏细观特性

**【DOI】** 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.01.009

目前为止, 国内外学者基于离散元法模拟压缩试验已经有很多研究成果。在采用离散元软件PFC<sup>2D</sup>模拟土体材料时, 解决颗粒细观参数的取值问题十分重要, 由于土工试验所得出的土体力学参数是宏观参数, 并不能直接作为PFC<sup>2D</sup>细观参数来应用。选取不同的细观参数值对PFC<sup>2D</sup>数值模拟得出的结果会造成很大影响。因此细观参数标定方法对细观参数与宏观参数的标定具有重要意义<sup>[1-5]</sup>。

本文在细观参数标定过程中, 通过采用模拟双轴压缩试验的方法, 系统研究无黏结模型的宏微观特性影响, 分析法向刚度、细观摩擦系数对土体宏观参数的影响规律, 研究成果可为PFC<sup>2D</sup>数值模拟细观参数取值的提供理论依据, 并提高选取细观参数的准确性, 进而提高计算效率。

## 一、压缩试验颗粒模型的建立

离散元软件PFC<sup>2D</sup>中双轴压缩试验的数值模拟分为生成墙体、生成颗粒、应力初始化、伺服控制和加载这些步骤。利用编写好的程序建立墙体, 接着采用半径扩大法在墙体中生成颗粒, 应力初始化即避免颗粒间重叠量过大, 接着对试样进行伺服加载。

根据土工规程可知, 试件的尺寸范围有要求, 一般 $h:d$ 在2.0-2.5范围内,  $h/R_{min} > 214$ 。故在创建材料模型时, 试件高度和宽度的比值也应该在2.0-2.5范围内。颗粒半径及颗粒个数的选取要保证在计算机计算承受范围内、且计算效率高, 故本文 $h:R_{min}$ 的值选取尽量过大。墙体作为边界, 其法向刚度值建议取颗粒法向刚度的1.1倍。内锁等向应力一般取单轴抗压强度的1%。内锁等向应力容许误差值一般取0.5。建成的试件模型进行固结后, 仍存在漂浮颗粒, 即接触小于3的颗粒, 故

非悬浮颗粒的最小接触数取值为3, 剩余悬浮颗粒的接触比取值为0。

本文模拟试验的式样采用高为1.6m, 宽为0.8m。考虑到生成过多颗粒会影响计算效率, 所以颗粒的半径设置为5mm, 满足了 $h/R_{min} > 214$ 的条件。颗粒密度设置为 $2650\text{kg/m}^3$ 。

## 二、无黏结模型细观参数的特征研究

对于无黏结模型材料来说, 一般指类似砂土这类无黏聚力值的材料, 其控制参数不涉及平行黏结强度或接触黏结强度值, 即颗粒间不存在黏结作用, 因此无需对黏结强度进行赋值。

### (一) 无黏结模型法向刚度的特征研究

颗粒刚度和刚度比对应力应变曲线形态影响最大, 因此首先研究颗粒刚度值对应力应变曲线形态的影响以及根据宏观参数值确定 $k_n$ 取值范围。

试验采用控制变量法, 共进行6组模拟试验, 初始细观参数取值如下: 围压取值为 $200\text{kPa}$ , 细观摩擦系数取值0.6, 颗粒法向和切向比值取值为1, 模型中颗粒平均半径为 $0.05\text{mm}$ , 颗粒法向刚度分别为 $1 \times 10^6\text{N/m}$ ,  $1.2 \times 10^6\text{N/m}$ ,  $1.4 \times 10^6\text{N/m}$ ,  $1.6 \times 10^6\text{N/m}$ ,  $1.8 \times 10^6\text{N/m}$ ,  $2.0 \times 10^6\text{N/m}$ 。图1为数值模拟计算后计算得出的应力应变曲线。

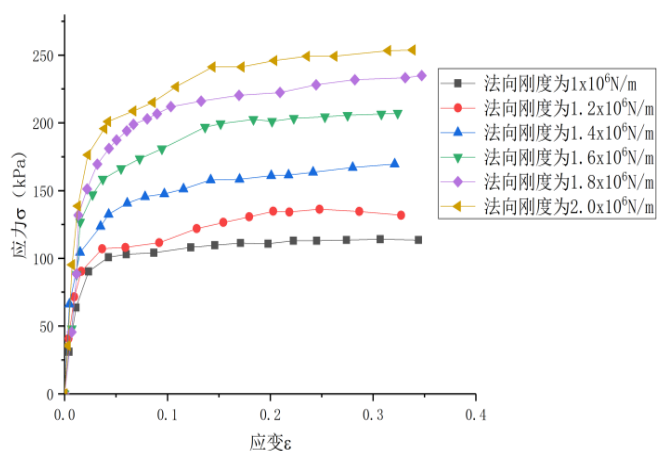


图1 不同法向刚度的应力应变曲线图

如图1所示, 对比6组应力应变曲线可以明显看出: 应力应变曲线的峰值强度随着颗粒法向刚度不断增大而增大。应力不再随着应力应变曲线中应变增长而线性增长时的点作为拐点, 拐点所对应的应力的大小为拐点强

度。将图1中应力应变曲线的拐点强度提取，表1为6组应力应变曲线的拐点强度值。

表1 不同法向刚度的拐点强度值

颗粒的法向刚度 $k_n$ (N/m)	拐点强度 $\sigma$ (kPa)
$1 \times 10^6$	100.82
$1.2 \times 10^6$	107.02
$1.4 \times 10^6$	123.61
$1.6 \times 10^6$	147.06
$1.8 \times 10^6$	169.53
$2.0 \times 10^6$	176.34

将表1中的数据绘制成散点图并对其进行线性拟合，如图2所示，拟合所得出的公式为：

$$\sigma_0 = 11.27238 + 84.08286k_n \quad (1)$$

其中，斜率的范围为 $84.0828 \pm 71.71175$ ，截距的范围为 $11.27238 \pm 11.04131$ 。

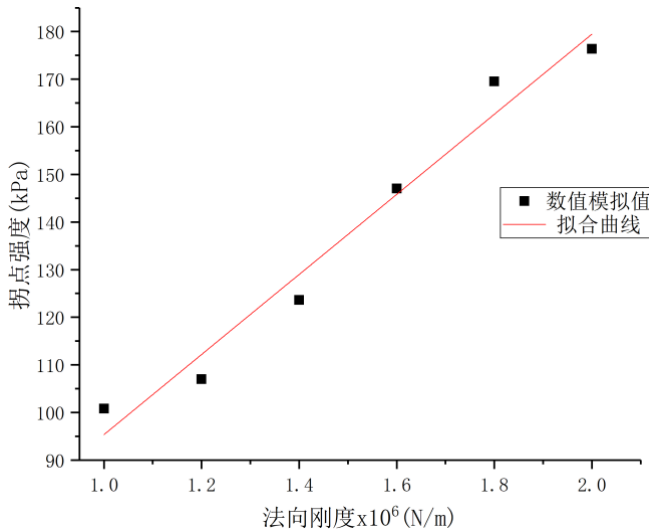


图2 拐点强度散点图和拟合曲线

由图2可知，数值模拟值均匀分布在曲线两侧，应力峰值强度误差率和拐点强度误差率在误差范围内，为之后颗粒法向刚度的选取范围提供依据。

(二) 无黏结模型细观摩擦系数的特征研究

PFC<sup>2D</sup>中生成的颗粒是圆形的，真实土体颗粒之间往往并没有这么规整，宏观的摩擦系数一般在0-1取值，细观摩擦系数的取值范围在理论上取大于0的任意值，对于摩擦特性比较明显的材料，有必要研究摩擦系数的影响。

通过进行三组双轴压缩试验，即在围压分别为200kPa、300kPa、500kPa条件下，每组保持其他参数不变，调节颗粒细观摩擦系数数值大小，分别取摩擦系数值为0.2、0.4、0.6、0.8、1.0。每组得出5条应力应变

曲线，如图3-5所示。

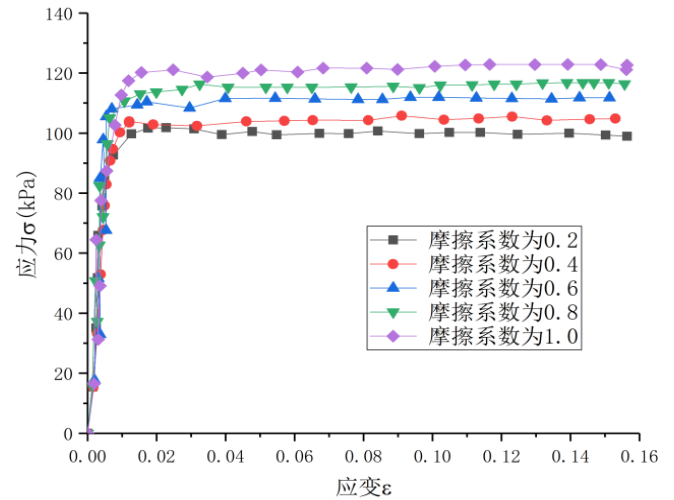


图3 200kPa应力应变曲线图

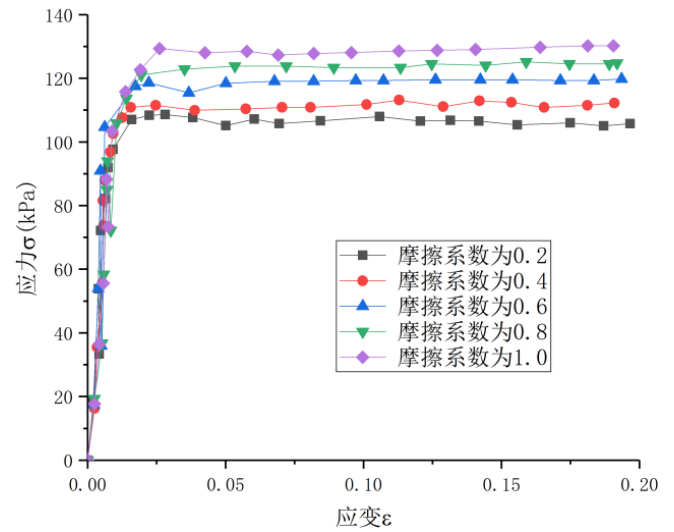


图4 300kPa应力应变曲线图

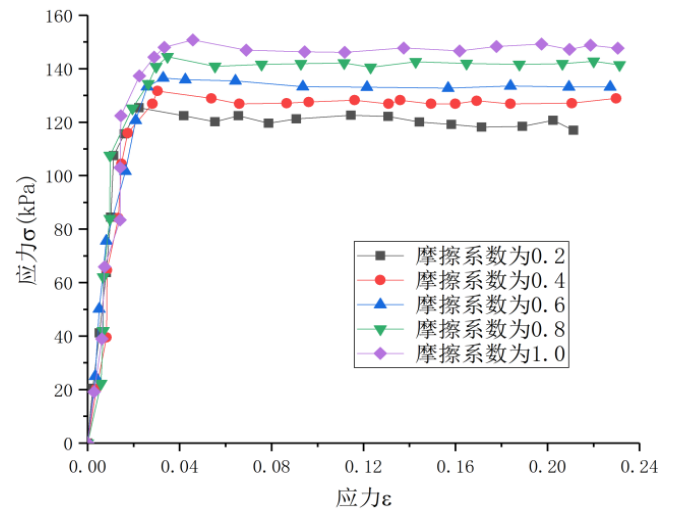


图5 500kPa应力应变曲线图

从图3-5中可以分析出：在围压相同的条件下，应力应变曲线形态的趋势受细观摩擦系数的影响较大，模型抗剪强度受细观摩擦系数影响较大，当摩擦系数值增大后，应力和应变峰值也随之加大。对比三组试验结果图片，可以得出随着围压的增加，应力应变曲线形态的趋势也受到较大的影响，其应力和应变峰值也随之加大。

我们取出图3-5中所有曲线的极限应力值，并得出极限应力圆，求出土体的内摩擦角，分析摩擦系数和内摩擦角的关系，其结果如图6所示，具体数值由下表2所示。

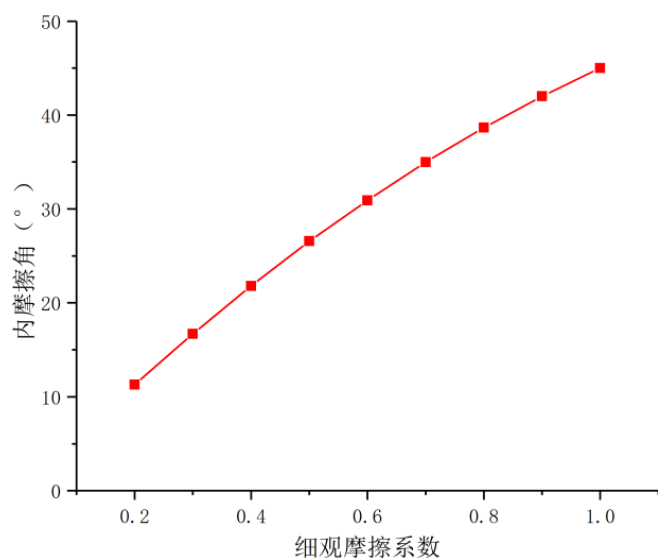


图6 摩擦系数与内摩擦角值的关系图

表2 摩擦系数与内摩擦角的关系

摩擦系数值	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
内摩擦角值 (°)	11.3	21.8	30.9	38.65	44.8

由图6可知，摩擦系数与宏观内摩擦角的关系成正比关系，分析表2中数值可以得出，摩擦系数与宏观内摩擦角正切值相近。可以为细观参数摩擦系数的选取提供参考。

#### 四、结论

本文首先介绍了离散元软件PFC<sup>2D</sup>对双轴压缩试验数值模拟的方法及过程，接着分析无黏结模中不同细观参数的取值对宏观参数的影响规律。主要得到以下结论：

(1) 首先选择确定颗粒法向刚度取值范围是首要的。应力应变曲线的峰值强度随着颗粒法向刚度不断增大而增大，得出了法相刚度与拐点强度值的关系式，可以为颗粒法向刚度的选取提供帮助。

(2) 应力应变曲线形态的趋势受细观摩擦系数的影响较大，摩擦系数与宏观内摩擦角的关系成正比关系，摩擦系数与内摩擦角的正切值相近。这为细观参数摩擦系数的选取提供参考：可以通过宏观内摩擦角直接确定摩擦系数。

#### 参考文献

[1] Lorig L J, Brady B G H. 13 A hybrid computational scheme for excavation and support design in jointed rock media [C] // Design and Performance of Underground Excavations: ISRM Symposium—Cambridge, UK, 3-6 September 1984. Thomas Telford Publishing, 1984:105-112.

[2] 张翀, 舒赣平. 颗粒形状对颗粒流模拟双轴压缩试验的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1281-1286.

[3] 朱遥, 刘春, 刘辉, 等. 颗粒形态对砂土抗剪强度影响的试验和离散元数值模拟[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 490-499.

[4] 何忠明, 黄超, 刘雅欣, 等. 粗粒土路堤填料力学特性及其细观模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(4): 1116-1124.

[5] 刘贱志, 滕伟福. 黏性土剪切过程中微观力学响应与细观参数的影响分析[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(6): 67-83.

作者简介: 高文宪(1989—), 男, 工程师, 研究方向为城市地下空间工程。