

颗粒流算例分析

KELILIU SUANLI FENXI

● 主 编 / 刘恩龙 邳 彬 曹 鹏
副主编 / 覃燕林 魏 巍 蒋 炼
田健秋 喻豪俊



四川大学出版社

颗粒流算例分析

KELILIU SUANLI FENXI

主 编 / 刘恩龙 鄧 彬 曹 鹏
副主编 / 覃燕林 魏 巍 蒋 炼
田健秋 喻豪俊



四川大学出版社

责任编辑:唐 飞
责任校对:胡晓燕
封面设计:墨创文化
责任印制:王 炜

图书在版编目(CIP)数据

颗粒流算例分析 / 刘恩龙, 郅彬, 曹鹏主编. —成都: 四川大学出版社, 2017. 3
ISBN 978-7-5690-0435-9

I. ①颗… II. ①刘… ②郅… ③曹… III. ①颗粒分析—高等学校—教材 IV. ①TQ172. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 048479 号

书名 颗粒流算例分析

主 编 刘恩龙 郅彬 曹鹏
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5690-0435-9
印 刷 郫县犀浦印刷厂
成品尺寸 170 mm×240 mm
印 张 10.75
字 数 205 千字
版 次 2017 年 3 月第 1 版
印 次 2017 年 3 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元



- ◆ 读者邮购本书, 请与本社发行科联系。
电话: (028)85408408 / (028)85401670 /
(028)85408023 邮政编码: 610065
- ◆ 本社图书如有印装质量问题, 请
寄回出版社调换。
- ◆ 网址: <http://www.scupress.net>

版权所有◆侵权必究

前 言

基于离散单元法的颗粒流分析方法可作为连续介质分析方法的补充，特别是对于土工建筑物在破坏机理方面的分析颗粒流具有很大的优势。近年来，国内外开展了许多有关颗粒流分析的研究，并取得了大量成果。自 2009 年以来，作者在四川大学岩土工程学科便开始指导研究生以及部分本科生开展颗粒流方面的研究，希望对开展的室内土工试验进行深入的机理分析。到目前为止，我们已经指导多名研究生和本科生采用颗粒流方法完成了室内直剪试验、三轴试验以及边坡、堆石坝和隧道工程的数值分析，考虑了颗粒破碎、循环加载、地震荷载作用等因素，相关文献参见书末参考文献。同时，在采用颗粒流模拟分析的过程中，我们也积累了一些经验。撰写这本书的主要目的是想把我们的计算经验分享给使用颗粒流的学生和科研工作者，以节省研究成本，因此每个算例都给出了相应的颗粒流计算代码。

本书略去了颗粒流的详细计算原理，重点介绍颗粒流的具体模拟算例。第 1 章为颗粒流计算原理简介；第 2 章至第 5 章是室内单元体试验模拟，包括颗粒流方法模拟直剪试验、双轴试验、颗粒破碎试验以及循环加载试验；第 6 章至第 8 章是颗粒流模拟方法在土工分析中的具体应用，包括边坡滑动过程分析、堆石坝动力分析以及隧道开挖分析。算例后的程序代码可以帮助读者自学或者将其改进后进行所需的算例分析。

本书由四川大学刘恩龙和西安科技大学鄧彬统稿和审定。各章节分工如下：第 1 章由刘恩龙和鄧彬编写，第 2 章由田健秋编写，第 3 章由曹鹏和蒋炼编写，第 4 章和第 7 章由覃燕林编写，第 5 章由魏巍编写，第 6 章由蒋炼编写，第 8 章由喻豪俊编写。读者如需电子版程序代码，请联系作者，E-mail:37150594@qq.com。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，希望读者多加指正。

编 者

2016 年 12 月于成都

目 录

第 1 章 颗粒流计算原理简介	(1)
1.1 颗粒流简介	(1)
1.2 计算原理	(2)
第 2 章 直剪试验	(6)
2.1 二维直剪模拟	(6)
2.2 三维直剪模拟	(11)
2.3 计算代码	(14)
第 3 章 双轴试验	(29)
3.1 算例 1	(29)
3.2 算例 2	(36)
3.3 计算代码	(38)
第 4 章 颗粒破碎试验	(54)
4.1 劈裂试验	(54)
4.2 双轴颗粒破碎试验	(56)
4.3 计算代码	(66)
第 5 章 循环加载试验	(77)
5.1 计算概况	(77)
5.2 循环加载模拟	(80)
5.3 计算代码	(90)
第 6 章 边坡滑动过程分析	(108)
6.1 边坡模型的建立	(108)
6.2 双轴试样的参数标定	(109)
6.3 边坡失稳及滑动过程分析	(110)
6.4 计算代码	(114)

第 7 章 堆石坝动力分析·····	(121)
7.1 试样的颗粒流模拟·····	(121)
7.2 堆石坝动力变形分析·····	(126)
7.3 计算代码·····	(128)
第 8 章 隧道开挖分析·····	(140)
8.1 工程地质概况·····	(140)
8.2 隧道散体力学模型建立·····	(141)
8.3 隧道开挖区域卵石地层变位演化规律·····	(143)
8.4 计算代码·····	(156)
参考文献·····	(166)

第 1 章 颗粒流计算原理简介

本章简单介绍颗粒流计算原理，具体计算原理和方法参见颗粒流使用说明。

1.1 颗粒流简介

颗粒流（程序）对应的英文是 Particle Flow Code，简称 PFC，是由 Itasca Consulting Group, Inc. 开发的计算程序，它是离散单元法的一种。颗粒流程序包括 PFC2D 和 PFC3D，可以用于颗粒材料在二维和三维条件下的力学分析。本书主要介绍颗粒流程序在应力变形分析方面的算例实施。

颗粒流把研究对象看成由大量的圆盘颗粒（2D）或球形颗粒（3D）组成的集合体，在加载过程中，以颗粒在接触点处发生的位移变化来体现试样或结构在宏观上的位移。颗粒在接触点满足接触关系，单个颗粒满足运动方程，应力和应变可以根据所取的测量圆中包含的颗粒集合体的平均值确定。

在颗粒流程序中，边界上可以通过边墙来实现对颗粒的位移施加，因此颗粒与边墙之间满足相应的接触定律。

颗粒流既可以进行单元体的计算模拟，也可以进行结构的计算模拟。由于颗粒接触之间的参数较多（比如，颗粒之间的法向刚度、切向刚度等），所以首先应进行单元体的模拟试验来确定细观参数，然后进行结构的模拟分析。计算所取的参数要满足土或颗粒物质的物理含义。

颗粒流模拟的主要步骤如下：（1）建立模型；（2）施加边界条件；（3）加载；（4）分析结果。

1.2 计算原理

1.2.1 计算步骤

在计算过程中，颗粒之间的接触会发生变化，包括失去已有的接触和生成新的接触，必须交替采用颗粒接触处的力—位移定律和颗粒的运动定律才可以保证计算的循环进行。同时，在计算过程中，颗粒与颗粒之间的接触关系以及颗粒与边墙之间的接触关系都需要进行更新，最终达到平衡状态。图 1-1 为循环计算示意图。

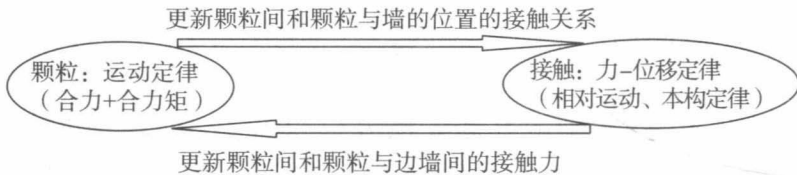


图 1-1 循环计算示意图

计算步骤如下：

第 1 步：判断接触关系。根据生成的颗粒集合体中每个颗粒的位置及几何尺寸，判断颗粒与邻近颗粒或者边墙是否接触。

第 2 步：计算接触作用力。当判断颗粒与颗粒以及颗粒与边墙之间存在的接触关系时，根据接触量和具体的接触模型计算接触力。

第 3 步：判断颗粒的合力及合力矩。经过计算，判断颗粒集合中某一颗粒的合力及合力矩是否为零（或为低于某一规定的允许值），如合力及合力矩不为零（或为不低于某一规定的允许值），该颗粒将在牛顿第二定律的规律下运动。

第 4 步：循环计算。在经过设定的时间步长之后，重新计算颗粒的位置坐标，再从第 1 步开始计算。当颗粒集合体中所有颗粒达到平衡时结束计算。

1.2.2 接触力—位移定律

在接触模型中，颗粒接触点的接触力和相对位移可以分解为沿法线和切线方向的两个分量，通过力—位移定律可以由法向刚度和切向刚度把接触力的法向、切向分量分别与法向、切向相对位移联系起来。第 i 个接触点的力 F_i 可以沿法向和切向进行分解，表示如下：

$$F_i = F_n + F_s \quad (1-1)$$

式中, F_n 和 F_s 分别为法向力和切向力, 如图 1-2 所示。

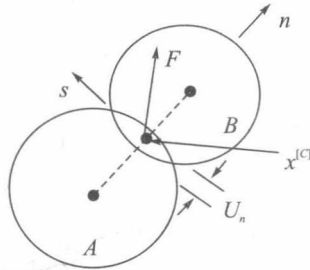


图 1-2 颗粒重叠示意图

两个接触实体之间的法向“重叠”量表示为 U_n , 则法向力 F_n 可以表示为

$$F_n = K_n U_n \quad (1-2)$$

式中, K_n 为接触点的法向刚度; n 为接触面单位向量。

对于颗粒集合体来说, 颗粒受到的剪切力与颗粒的相对运动、加载历史以及应力路径相关。因此, 在颗粒流模型中, 剪切力的计算以增量表示。在颗粒集合体模型生成时, 总的接触力的切向分量初始化为零, 在后续加载时位移的变化所引起的切向接触力则累加到前一步的数值上。切向力增量表示为

$$\Delta F_s = -K_s \Delta U_s \quad (1-3)$$

式中, K_s 为接触点的切向刚度; ΔU_s 表示在计算时步内接触位移的切向增量, 由下式得到:

$$\Delta U_s = v_s \Delta t \quad (1-4)$$

式中, Δt 为时间步长增量; v_s 为速度。

总的切向接触力是在计算时步内的相对位移引起的切向接触力累加到初始值得到的, 示意如下:

$$F_s \leftarrow F_s + \Delta F_s \leq \mu F_n \quad (1-5)$$

式中假定接触满足库仑定律, 且 μ 为两接触实体之间的摩擦系数。

同理, 实体之间在接触点 i 的接触力及力矩在计算时步内的更新如下:

$$F_i = F_n n_i + F_s s_i \quad (1-6a)$$

$$F_i^{[\varphi^1]} \leftarrow F_i^{[\varphi^1]} - F_i \quad (1-6b)$$

$$F_i^{[\varphi^2]} \leftarrow F_i^{[\varphi^2]} + F_i \quad (1-6c)$$

$$M_i^{[\varphi^1]} \leftarrow M_i^{[\varphi^1]} - e_{ijk} (x_j^{[C]} - x_j^{[\varphi^1]}) F_k \quad (1-6d)$$

$$M_i^{[\varphi^2]} \leftarrow M_i^{[\varphi^2]} + e_{ijk} (x_j^{[C]} - x_j^{[\varphi^2]}) F_k \quad (1-6e)$$

式中, $F_i^{[\varphi^j]}$, $M_i^{[\varphi^j]}$ 分别表示接触力和力矩, 详细的介绍参见颗粒流使用说明; e_{ijk} 表示排列符号。

1.2.3 运动定律

根据实体之间的接触力-位移定律，由以上的计算原理可以计算出作用在单个颗粒上的合力及合力矩，然后利用牛顿第二定律就可以计算出颗粒的加速度，即角加速度。由此，我们可以得到在设定的计算时步中每个颗粒的位移、速度以及角速度。

颗粒的运动方程可用两组矢量方程来表示：（1）平动下合力与运动的关系；（2）旋转运动下合力矩与运动的关系。具体方程如下所示：

$$\begin{cases} F_i = m(\ddot{x}_i - g_i) \\ M_i = \dot{H}_i \end{cases} \quad (1-7)$$

式中， F_i 为合力； m 为颗粒的质量； \ddot{x}_i 为加速度； g_i 为重力加速度； M_i 为合力矩； \dot{H}_i 为角动量。

1.2.4 边界及初始条件

一般情况下，颗粒流模型的荷载是通过重力或者边界墙体的运动来施加的。重力加速度在颗粒流模型中由命令 set gravity 进行描述，颗粒和边界墙的初始条件及边界条件可以通过颗粒流程序中的命令来实现。对于边界墙，我们可以指定其线速度或者角速度，但是不能对其施加外力。边界墙的速度由三个参量：线速度 $\dot{x}_i^{[W]}$ 、角速度 $\omega_i^{[W]}$ 及旋转中心 $x_i^{[W]}$ 来描述。墙的运动可以通过不断更新定义墙的位置 P 来描述，如下式：

$$\dot{x}_i^{[P]} = \dot{x}_i^{[W]} + e_{ijk}\omega_i^{[W]}(x_k^{[P]} - x_k^{[W]}) \quad (1-8)$$

对于每一个颗粒，外部施加的力及力矩都通过颗粒的重心，其初始速度可以通过颗粒流的初始化命令实现。在模拟过程中，施加的力或力矩都保持常量，并累加到当前值。

1.2.5 接触本构模型

1. 接触刚度模型

接触刚度模型提供了接触力和相对位移的弹性关系。接触刚度把法向和切向的接触力和相对位移联系起来，见式（1-3）和式（1-4）。

在颗粒流中有两种接触刚度模型，即线性接触刚度模型与简化的 Hertz-Mindlin 接触刚度模型。颗粒流中没有定义具有线性接触的圆盘或球形颗粒与具有 Hertz 模型的圆盘或球形颗粒之间的接触。同时，Herzt 模型与胶结模型也不相容。

2. 滑动模型

滑动模型在相互接触颗粒之间没有法向抗拉强度，允许颗粒在其抗剪强度范围内发生滑动。滑动模型适用于模拟颗粒间不存在黏聚力的散体材料（如砂土）。

滑动模型是通过两接触颗粒间摩擦系数进行定义的，其中摩擦系数取两接触实体中的最小值。若颗粒之间重叠量小于或等于零，则设定法向和切向接触力等于零。两颗粒之间发生滑动的判别条件为：

$$F_{smax} = \mu |F_n| \quad (1-9)$$

如果 $|F_s| > F_{smax}$ ，则颗粒之间发生滑动，滑移后的 F_s 计算为：

$$F_s \leftarrow F_s (F_{smax}/|F_s|) \quad (1-10)$$

3. 胶结模型

在实际的土颗粒之间存在许多黏结作用，所以在颗粒流模型中允许相互接触的颗粒胶结在一起。颗粒流提供两种胶结模型：触点胶结（the contact-bond model）与并行胶结（the parallel-bond model）模型。触点胶结假设胶结只发生在接触点极小的范围内，且触点胶结只能传递力；而并行胶结发生在接触颗粒间一定大小的范围内，且并行胶结不但能够传递力，同时也能传递力矩。当颗粒之间存在胶结材料时，采用并行胶结模型进行模拟。

可以假定触点胶结为一对有恒定法向刚度与切向刚度的弹簧作用于颗粒接触点处，且假定弹簧有一定的抗拉强度与抗剪强度。当接触点处没有重叠量时，触点胶结模型允许在接触点出现拉应力，但是接触点的法向拉力不能超过法向触点胶结强度；当接触点的法向拉力大于或等于法向触点胶结强度时，颗粒之间的胶结就会被破坏，此时法向和切向的接触力设定为零；当切向接触力大于或等于切向胶结强度时，胶结也会被破坏，但是只要切向力不超过摩擦极限，法向接触力就不发生变化。图 1-3（a）和（b）分别给出了颗粒接触点处法向和切向接触力与相对位移关系的本构特性。

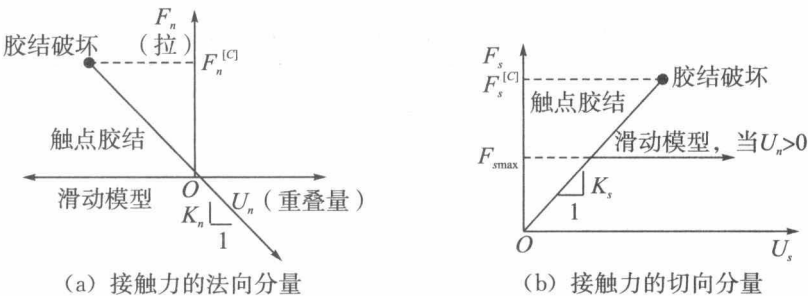


图 1-3 发生在某点接触的本构特性

并行胶结的具体介绍参见颗粒流使用说明。

第 2 章 直剪试验

本章进行直剪试验模拟，包括二维和三维试验试样生成、结果分析，其中二维直剪模拟了密砂，三维直剪模拟了松砂。

2.1 二维直剪模拟

数值模拟中直剪试验的实现，以 PFC2D 为例进行说明，包括如下步骤：
(1) 直剪盒生成：通过生成八面墙来模拟实际的直剪盒，其中两面翼墙的作用是为了防止颗粒在直剪过程中掉出直剪盒，其他六面墙用来模拟直剪盒。
(2) 法向应力施加：直剪试验的法向应力的施加是通过给直剪盒上盒的顶墙施加相应的压力由伺服来实现的。
(3) 直剪盒剪切：直剪中的剪切过程是通过给直剪盒下部三面墙施加相同的速度，直剪盒上部三面墙保持静止来实现的。

2.1.1 参数选择

此次直剪试验采用的试样尺寸为 $61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ，颗粒接触模型采用的是线性刚度模型，试样中颗粒形状为圆盘形，颗粒半径为 $0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$ ，颗粒级配连续分布，试样的初始孔隙率为 0.16，其他详细的试验参数见表 2-1。

表 2-1 PFC2D 数值模拟模型基本参数

参 数	数 值
颗粒间接触刚度 (Pa)	$K_n = 2.5 \times 10^7$ $K_s = 2.5 \times 10^7$
颗粒与墙接触刚度 (Pa)	$K_n = 5.0 \times 10^7$ $K_s = 5.0 \times 10^7$
颗粒间摩擦系数	制样: 0.0 剪切: 0.5

续表 2-1

参 数	数 值
颗粒与墙摩擦系数	制样: 0.0 剪切: 0.0
颗粒密度 (kg/m^3)	2 630

2.1.2 试样生成

下面探讨 PFC2D 试样的生成方法。

试样生成方法 1: 根据常规的生成试样方法, 先在宽 61.8 mm、高 20 mm 的直剪盒里按孔隙率 0.16 生成初始试样, 再对上盒的顶墙施加伺服以达到法向应力。得到的试样中会有大量颗粒重叠 (图 2-1), 一般情况下利用 cycle 命令多运行一段时间, 颗粒的重叠量就会减少; 但是有些特殊情况下 (如试样颗粒为异形颗粒), 颗粒重叠量不会随着程序 cycle 的次数增加而减少, 此时我们想要获得合格的试样, 就必须通过另外一种方法来实现。

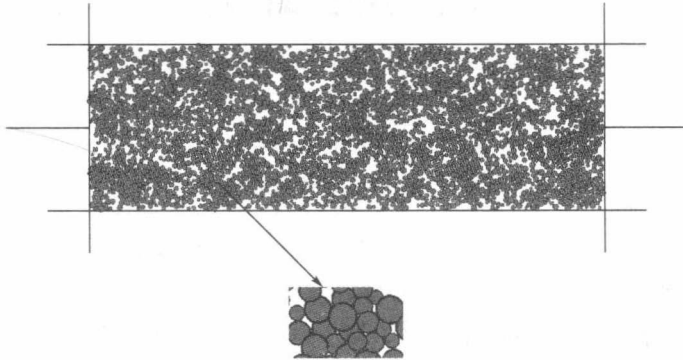


图 2-1 试样内颗粒发生大量重叠

试样生成方法 2: 首先通过常规的生成试样方法在宽 61.8 mm、高 20 mm 的直剪盒里按孔隙率 0.16 生成试样, 记录下此时生成的颗粒个数, 记为 n ; 然后利用 generate 命令在宽 61.8 mm、高 60 mm 的盒子内按前一步的颗粒尺寸生成 n 个颗粒, 此时颗粒几乎没有重叠 (图 2-2); 最后通过给上盒的顶墙和下盒的底墙施加相同的伺服, 使盒子压缩到宽 61.8 mm、高 20 mm (图 2-3), 这个时刻的试样与方法 1 在直剪盒范围内按孔隙率生成的颗粒一致; 顶墙和底墙伺服继续施加, 达到法向应力后停止底墙伺服施加, 顶墙伺服保持不动。

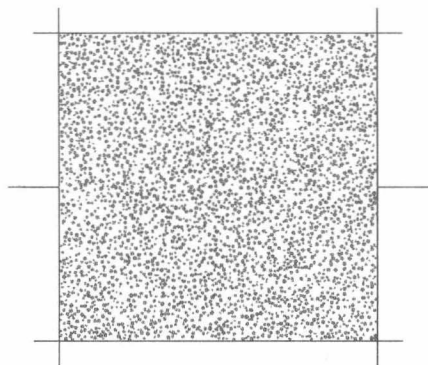


图 2-2 扩大范围后生成无重叠的颗粒

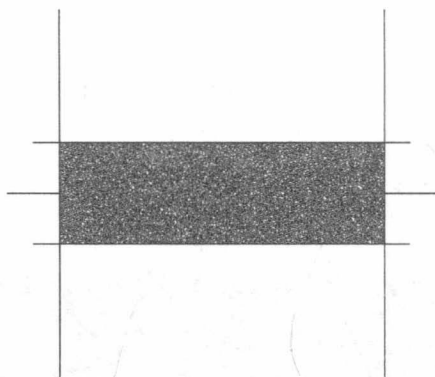


图 2-3 无颗粒重叠的初始试样

方法 1 与方法 2 的一致性探讨：按照方法 2 来生成颗粒，需要保持颗粒尺寸、级配和密度与方法 1 生成颗粒时采用的参数一致，这样得到的初始试样才一致。其中，颗粒尺寸和密度在两个方法中的一致性可以通过命令看出来；而两个方法中颗粒的级配需要命令画出它们各自的级配曲线作对比，通过图 2-4 的级配曲线可知，方法 1 与方法 2 的颗粒级配一致。初始试样生成后，方法 1 只对顶墙施加伺服，满足法向应力；方法 2 对顶墙和底墙都施加伺服，满足法向应力后停止底墙的伺服，此时底墙与翼墙的高差相对于方法 1 的底墙与翼墙的高差有微小区别，可以忽略不计。故认为两种生成试样的方法是一致的。本章末尾附带的 PFC2D 程序试样生成方法采用的是方法 2。

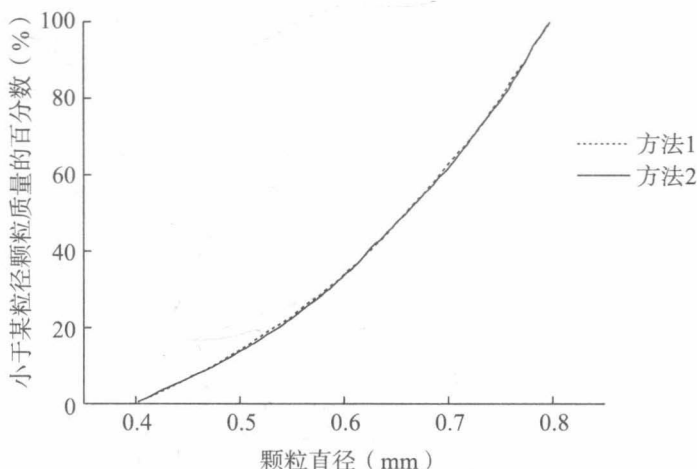


图 2-4 两种制样方法级配曲线对比

2.1.3 结果分析

利用 PFC2D, 通过数值模拟散体颗粒材料的直剪试验得到了相同密实度下不同法向应力的剪切应力—水平位移曲线、竖向位移—水平位移曲线。通过分析发现, 数值模拟的直剪试验规律符合室内直剪试验规律。本节中定义压缩为正、膨胀为负。

需特别说明的是, 读者需要根据自己实际的数值模拟来调整相应的参数, 以达到所要求。

1. 剪切应力—水平位移曲线

在相同初始孔隙率、不同法向应力下做数值模拟试验, 得到不同法向应力作用下散体颗粒材料的剪切应力—水平位移曲线 (图 2-5)。由剪切应力—水平位移曲线可知, 散体颗粒材料的峰值剪切应力和残余剪切应力都随着法向应力由 100 kPa 增长到 400 kPa 而不断增大, 这与室内试验规律一致: 随着法向应力的增加, 颗粒在剪切过程中达到的密实程度更高, 所以峰值剪切应力和残余剪切应力更大。由图 2-5 中的曲线可以看出, 剪切应力—水平位移曲线的初始变形模量随着法向应力的增加而不断增加, 这与室内试验规律一致: 随着法向应力增加, 试样的密实程度不断提高, 而密实程度越高的颗粒材料试样, 它的初始变形模量也就越大。

由以上分析可知, 数值模拟直剪试验得到的剪切应力—水平位移曲线与室内直剪试验得到的剪切应力—水平位移曲线规律一致。

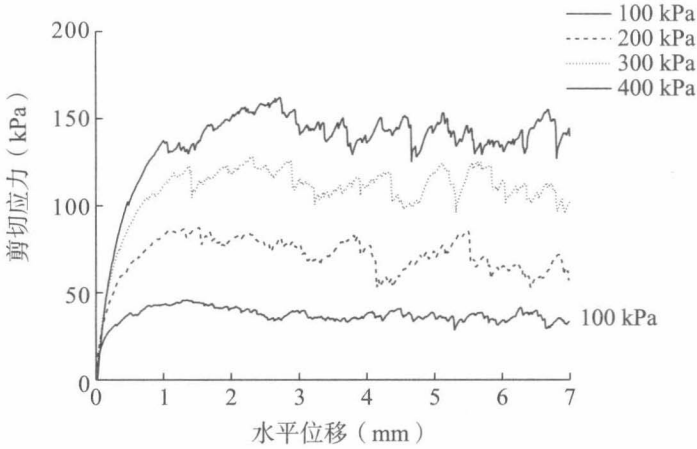


图 2-5 不同法向应力作用下试样剪切应力-水平位移曲线

2. 竖向位移-水平位移曲线

在相同初始孔隙率、不同法向应力下做数值模拟试验，得到不同法向应力作用下散体颗粒材料的竖向位移-水平位移曲线（图 2-6）。由竖向位移-水平位移曲线可知，散体颗粒材料在初始剪缩阶段，最大体缩量随着法向应力由 100 kPa 增加到 400 kPa 而不断增大，与室内直剪试验的规律一致：随着法向应力的增加，相同初始孔隙率的试样内孔隙更容易被压密，从而体缩量增大。散体颗粒材料的最大剪胀量随着法向应力的增加而不断降低，与室内试验规律一致：随着法向应力的增加，散体材料内的颗粒发生翻滚和错动更加困难，所以剪胀量会降低。

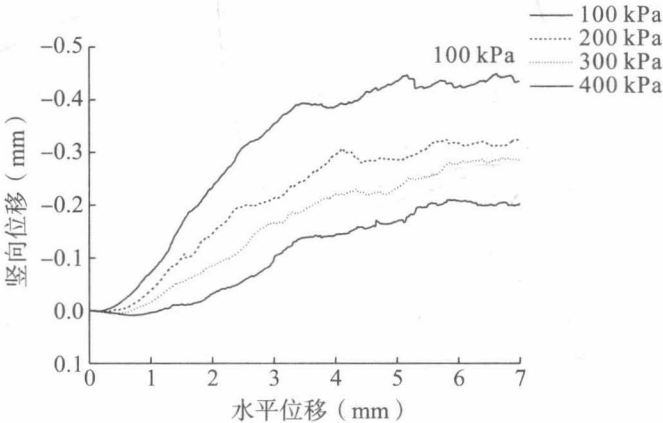


图 2-6 不同法向应力作用下试样竖向位移-水平位移曲线

对数值模拟直剪试验进行分析发现, 竖向位移—水平位移曲线符合密砂的室内试验结果, 因此, 我们可以利用数值模拟直剪试验来研究散体颗粒材料(或者有黏性的颗粒材料)在二维条件下的宏观和微观力学特性。

2.2 三维直剪模拟

以 PFC3D 为例对数值模拟的直剪试验进行说明, 包括如下步骤: (1) 直剪盒生成: 直接用圆柱体生成上、下盒(其中上盒上、下皆无盖, 下盒上部不封闭, 下部封闭), 在上盒顶部生成一个圆盘形墙(作为直剪盒顶盖), 再生成两面翼墙防止颗粒在剪切过程中掉出直剪盒。(2) 法向应力施加: 直剪试验的法向应力的施加是通过给直剪盒上盒的顶盖施加相应的压力由伺服来实现的。(3) 直剪盒剪切: 上盒、顶盖及一面翼墙始终保持静止, 通过赋予下盒和其中一面翼墙相同的速度来实现直剪仪的剪切过程。

2.2.1 参数选择

此次直剪试验采用的试样尺寸为高 20 mm、半径 30.9 mm 的圆柱, 颗粒接触模型采用的是线性刚度模型, 试样中颗粒形状为圆球形, 颗粒半径为 1~2 mm, 颗粒级配连续分布, 试样的初始孔隙率为 0.5, 其他详细的试验参数见表 2-2。

表 2-2 PFC3D 数值模拟模型基本参数

参 数	数 值
颗粒间接触刚度 (Pa)	$K_n = 5.0 \times 10^7$ $K_s = 5.0 \times 10^7$
颗粒与墙接触刚度 (Pa)	$K_n = 1.0 \times 10^9$ $K_s = 1.0 \times 10^9$
颗粒间摩擦系数	制样: 0.5 剪切: 0.5
颗粒与墙摩擦系数	制样: 0.0 剪切: 0.0
颗粒密度 (kg/m^3)	2 630

2.2.2 试样生成

PFC3D 生成试样的方法是在长 61.8 mm、宽 61.8 mm、高 20 mm 的矩形范