

## 部件复杂表面影响土壤扰动 行为的离散元宏细观分析

张锐<sup>1,2</sup>,李建桥<sup>1</sup>,李因武<sup>1</sup>,刘子斌<sup>3</sup>,陈斌<sup>1</sup>

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室 长春 130022; 2. 中国科学技术大学力学和机械工程系 合肥 230027; 3. 西北农林科技大学农学院,陕西 杨陵 712100)

**摘要:**通过分析毛管水形成液桥对土壤微观力学结构的影响,引入并行约束来表征土壤颗粒间液桥的黏性作用,建立了土壤颗粒接触非线性力学模型,并对波纹形复杂表面推土板前端土壤的动态扰动行为进行了离散元宏细观模拟。结果表明,离散元模拟不仅准确再现了实验分析中复杂表面结构对土壤动态扰动行为影响的研究结果,而且从土壤颗粒运动以及土块破碎等细观角度准确分析了触土部件复杂表面对土壤动态扰动行为的影响因素和机理。

**关键词:**农业工程;土壤动态扰动行为;离散单元法;非线性力学模型;宏细观模拟;波纹形表面  
**中图分类号:**S152.9      **文献标识码:**A      **文章编号:**1671-5497(2009)05-1218-06

## DEM macroscopic and mesoscopic analysis in disturbed behavior of soil acted by part with complex surface

ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, LI Jian-qiao<sup>1</sup>, LI Yin-wu<sup>1</sup>, LIU Zi-bin<sup>3</sup>, CHEN Bin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China;  
2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;  
3. College of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:**Based on the effects of liquid bridges formed by the capillary water on the micromechanical structure of soil, a nonlinear mechanical model of contact between soil particles was established by introducing parallel bonds which can represent the cohesive actions of liquid bridges between soil particles. The dynamic disturbed behavior of soil, which was subject to the bulldozing plate with a complex wavy surface, were simulated by discrete element method (DEM) from the macroscopic and the mesoscopic aspects. The DEM simulations reappear the qualitative and the quantitative results by laboratory test accurately. Moreover, from the mesoscopic analyses by DEM, including the soil particle motion and the soil clump fracture, the influencing factors and the mechanism on the dynamic behavior resulted from the complex surface of the soil-touching part were given accurately.

**Key words:** agricultural engineering; dynamic disturbed behavior of soil; distinct element method (DEM); non-linear mechanical model; macroscopic and mesoscopic simulation; wavy surface

收稿日期:2007-09-16.

基金项目:国家自然科学基金项目(50175045,10472114,50805064);吉林省科技发展计划项目(20080146);教育部  
科学技术研究重点项目(107035);2006年度中国科学院王宽诚博士后工作奖励基金项目;2008年度吉林  
大学“985工程”研究生创新计划项目(20080203).

作者简介:张锐(1975-),男,副教授,博士。研究方向:数值计算。E-mail:zhangrui@jlu.edu.cn

通过优化触土部件表面结构来提高地面机械作业效率并降低能耗,同时改善土壤耕作质量,不仅需要对部件受到的土壤的作用力进行分析,而且需要研究复杂表面结构作用下土壤的动态扰动行为变化规律和影响因素。由于土壤性质和结构的复杂性,传统的实验和理论尚不能对其动态行为的某些现象、过程或问题进行确切解析,急需寻求新的理论和方法来解决这方面的问题<sup>[1]</sup>。

离散单元法(Distinct element method, DEM)作为分析离散物质的不连续数值模拟方法,为具有典型离散结构土壤的复杂动态扰动行为分析提供了全新的解决途径<sup>[2]</sup>。目前,很多学者已经对土壤扰动行为进行了分析,但大多数研究中建立的土壤离散元模型过于简化,难以合理并准确表征土壤内部微观力学结构,尤其是土壤内水分对土壤颗粒之间相互作用的影响<sup>[3-5]</sup>。为了准确分析部件复杂表面结构对土壤动态行为的影响因素和机理,本文根据土壤内水分形成液桥对土壤颗粒间作用力的影响,建立土壤颗粒接触非线性力学模型,使用离散元软件 PFC2D<sup>®</sup>对典型复杂表面部件——波纹形推土板前端土壤动态扰动行为的宏细观变化过程和规律进行研究。

## 1 土壤离散元力学模型

土壤中除了土壤颗粒作为骨架以外,液态水是重要组成部分,它通常以吸湿水、膜状水、毛管水和重力水的形式存在,如图1所示<sup>[6]</sup>。其中,毛管水在土壤颗粒空隙间形成不连续液桥,这些液桥在土壤颗粒之间产生黏性作用,是影响土壤颗粒之间作用力的重要因素,土壤颗粒间的液桥模型如图2所示。液桥会在土壤颗粒之间产生“静态”毛细管力和“动态”黏性力。当土壤颗粒之间的水分以不连续的液桥存在时,毛细管力占主要地位。而当土壤中水的黏滞性很强或者土壤颗粒之间相对速度很低时,黏性力变成了主要因素<sup>[7]</sup>。

毛细管力与液桥凹凸面半径以及液桥表面张力 $\gamma$ 相关,计算式为

$$F_c = \pi\gamma\rho_2 \frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_1} \quad (1)$$

式中: $F_c$ 为毛细管力; $\rho_1$ 和 $\rho_2$ 分别为液桥的凹面和凸面半径。

$$\begin{cases} \rho_1 = \frac{s_i + R_i(1 - \cos\phi_i)}{\cos(\phi_i + \theta)} \\ \rho_2 = R_i \sin\phi_i - \rho_1 [1 - \sin(\phi_i + \theta)] \end{cases} \quad (2)$$

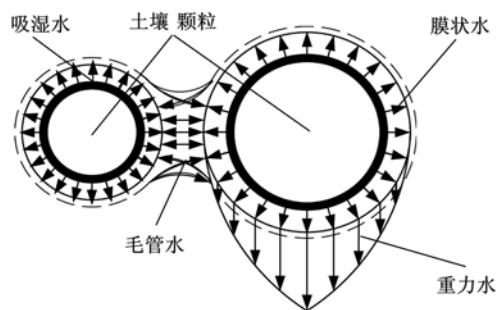


图1 土壤液态水存在形式示意图

Fig. 1 Existing types of water in soil

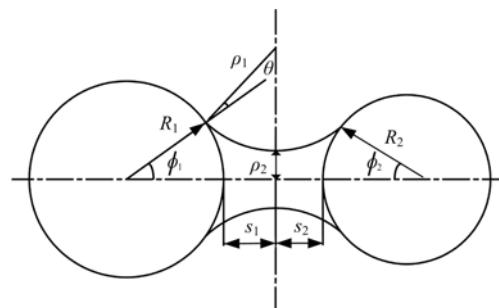


图2 土壤颗粒间的液桥模型

Fig. 2 Liquid bridge model between soil particles

式中: $R_i$ 为两颗粒半径; $s_i$ 为两颗粒到液桥颈部的距离; $\theta$ 为颗粒的水接触角; $\phi_i$ 为两颗粒的切入角, $i=1$ 或 $2$ 。

黏性力包括空隙水分径向压流产生的法向分量和空隙水分剪切流产生的切向分量。土壤颗粒之间液桥的动态黏附力的法向分量和切向分量计算式为<sup>[8-9]</sup>

$$F_{vn} = 6\pi\eta R^* v_n \frac{R^*}{s_1 + s_2} \quad (3)$$

式中: $F_{vn}$ 为动态黏附力法向分量; $\eta$ 为土壤水黏滞系数; $v_n$ 为两土壤颗粒间的相对法向速度; $R^*$ 为土壤颗粒简化半径, $R^* = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ 。

$$F_{vt} = 6\pi\eta R^* v_t \left( \frac{8}{15} \ln \frac{R^*}{s_1 + s_2} + 0.9588 \right) \quad (4)$$

式中: $F_{vt}$ 为动态黏附力的切向分量; $v_t$ 为两土壤颗粒间的相对切向速度。

为了合理表征水分形成液桥对土壤颗粒之间的黏性作用,本文将力学结构与之相似的并行约束引入土壤颗粒接触力学模型中,同时在传统离散元理论基础上,除了考虑土壤颗粒之间的接触力、摩擦力以外,还在土壤颗粒接触处加入法向阻尼器和切向阻尼器,用黏性阻尼来消散土壤颗粒相互碰撞时产生的高能量,最终建立综合表征土壤颗粒之间接触、滑移和内聚作用,以及颗粒碰撞

能量消散影响的土壤颗粒接触非线性力学模型,如图3所示<sup>[10]</sup>。图3(a)表示非线性力学模型,图3(b)表示并行约束模型,假定两个土壤颗粒为圆盘A和B,  $\bar{R}$ 为约束半径,  $\mathbf{F}_n^{pb}$  和  $\mathbf{F}_s^{pb}$  分别为并行约束法向力和切向力矢量,  $\mathbf{M}_3^{pb}$  为并行约束合力矩矢量,  $t$  为圆盘厚度。

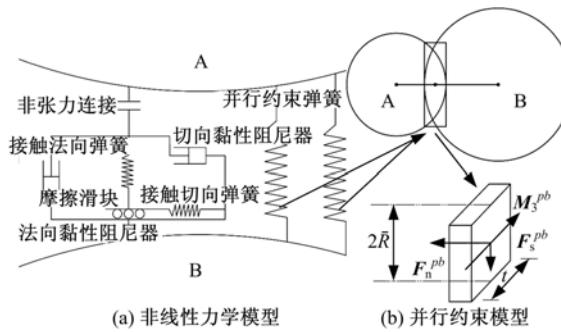


图3 土壤颗粒接触非线性力学模型

Fig. 3 Nonlinear mechanical model of contact between soil particles

模型中的并行约束描述了沉积在两颗粒间一定尺度黏性物质的本构特性<sup>[11]</sup>,一个并行约束可以看作一系列具有恒定法向和切向刚度的弹性弹簧,这些弹簧均匀分布在以接触点为中心的接触平面的矩形横截面上,它们与接触弹簧、摩擦滑块以及黏性阻尼器并行作用,如图3所示。当并行约束建立以后,一旦两约束颗粒相对运动,并行约束刚度的影响会在并行约束物质内部产生作用力和力矩。这些作用力和力矩作用在两约束颗粒上,并且它们与作用在约束物质内部的最大法向和最大切向应力相关。如果任一最大法向或切向应力超过它们对应约束强度时,并行约束断裂。并行约束模型的这种力学结构与两土壤颗粒之间的液桥接近,能够合理表征液桥产生的黏性作用。

## 2 部件与土壤相互作用分析系统

### 2.1 实验室实验测试系统

本研究选取波纹形推土板作为复杂表面触土部件,波纹形表面按照函数  $y = \sin(\pi x / 8)$  进行设计,如图4(a)所示。实验室实验测试系统如图4(b)所示。图中,a为9327A型三向力传感器,b为波纹形推土板,c为SFZ-shi001型土槽实验台,d为5019B型多通道电荷放大器,e为多通道电压虚拟仪器,f为数据采集和分析的笔记本电脑。本研究选用含水量6%的沙黏土作为实验土壤,土壤的机械组成如表1所示。

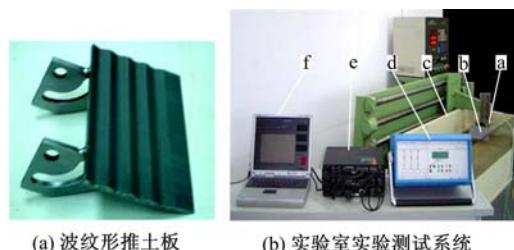


图4 触土部件与实验测试系统

Fig. 4 Soil-touching parts and the testing system in laboratory test

表1 土壤机械组成

Table 1 Mechanical components of soil

塑限 /%	液限 /%	粒级百分含量/mm, %				
		5~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.074	0.074
17.6	27.61	4.6	32.5	17	25.5	20.4

### 2.2 离散元模拟系统

在复杂表面触土部件作用下土壤动态扰动行为分析中,研究的重点是板面前端土体关键部分的动态扰动变化规律。为了与实验采集图像进行对比分析,并清晰再现波纹形板前端不同位置土体中土壤颗粒的动态行为变化过程,在离散元土壤分析系统中,与实验室实验对应地产生5层模拟土壤,如图5所示。

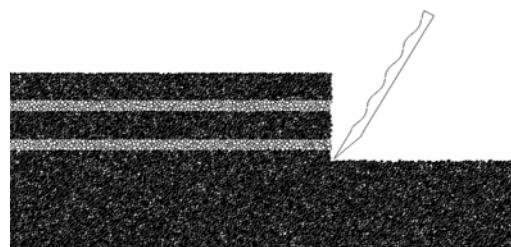


图5 离散元模拟系统

Fig. 5 Simulation system by DEM

在确定土壤颗粒接触力学模型参数以及模拟土壤颗粒结构参数时,根据量纲分析确定宏观与细观参数的尺度定律,以不固结不排水条件下 SJ-1A 三轴剪力仪测定的宏观参数为依据,通过反复执行并调整输入参数的离散元模拟双轴实验,最终使离散元模拟与实验室实验的应力-应变曲线趋于一致。通过这种方法确定的土壤离散元模拟参数如下:土壤颗粒最小半径  $r_{min} = 0.3$  mm;颗粒半径比  $r_{max}/r_{min} = 3.24$ ;摩擦系数  $\mu = 0.5$ ;接触法向刚度  $k^n = 2.42 \times 10^5$  (N · m<sup>-1</sup>);接触刚度比  $k^n/k^s = 2.34$ ;法向临界阻尼比  $\beta^n = 0.84$ ;切向临界阻尼比  $\beta^s = 0.62$ ;并行约束半径放大系数  $r_{pb} =$

0.1; 并行约束法向刚度  $k_{pb}^n = 1.35 \times 10^8$  (Pa · m<sup>-1</sup>); 并行约束刚度比  $k_p^n/k_{pb}^n = 1.86$ ; 并行约束强度  $\sigma = 2.35 \times 10^3$  Pa; 并行约束强度偏差  $\sigma^{dev} = 0.12$ ; 时间步长  $\Delta t = 4.47 \times 10^{-5}$  s。

### 3 复杂表面影响土壤行为模拟分析

部件复杂表面作用下的土壤动态扰动是一个复杂过程。实验室实验虽然直观、可信,但只能从土壤外部宏观形态来研究土壤动态扰动过程,很难从土壤内部结构细微演化准确分析土壤动态行为变化规律。土壤动态行为实际上是组成土壤的土块和土壤颗粒运动过程的综合体现,因此,应当从土壤颗粒运动入手,对土壤的扰动变化进行研究<sup>[12]</sup>。土壤扰动行为离散元模拟即是从土壤结构细观角度出发,以土壤颗粒为基本研究单元,对土体的宏细观动态扰动行为进行研究。

#### 3.1 离散元模拟有效性评价

为了验证触土部件复杂表面与土壤相互作用离散元模拟的合理性和准确性,通过与实验室实验结果对照,从定性和定量两方面进行分析。图6为波纹形推土板前端土壤宏观动态行为的离散元模拟和实验室实验变化图。从图6(a)中离散元模拟结果可以看出,由于波纹形板面的影响,推土板板面前端的土壤发生有规律的波动变化,即靠近板面的土壤波动幅度较小,波动频率较大;而远离板面的土壤波动幅度较大,波动频率较小。这些现象与图6(b)中实验室实验结果相比,土壤外部宏观形态的动态变化情况基本一致。

根据作用力与反作用力定律,土壤对推土板的动态作用力与板面前端土壤的动态扰动变化直接相关,并且这种作用力的变化规律可以作为土壤动态扰动变化机理和影响因素的定量表述。图

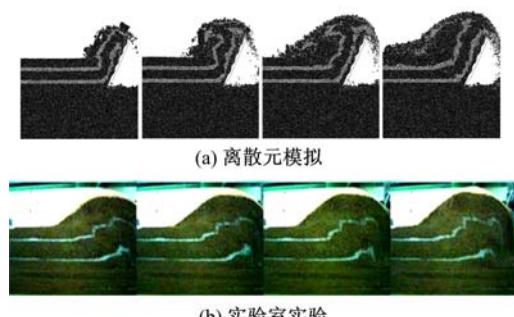


图6 推土板前端土壤宏观动态行为变化图

Fig. 6 Dynamic macroscopic configurations of soil ahead of the bulldozing plate

7为波纹形推土板受到土壤的动态作用力(包括水平作用力和垂直作用力)的变化曲线。从图中可以看出,离散元模拟中推土板受到的动态作用力总体上略小于实验室实验结果。这是由于在土壤动态行为离散元模拟中,土壤颗粒假定为圆盘形,尽管引入并行约束使土壤颗粒形成不规则土块,但是干土壤中并行约束强度较弱,土块极易破碎形成光滑边缘小土块或者离散的圆盘颗粒,这种小土块或者离散颗粒与实际干土壤中不规则土壤颗粒相比有较大的滚动性,从而使模拟中推土板受到的动态作用力略小于实验室实验中的情况。同时,在离散元模拟中没有考虑土壤与土槽侧面的摩擦作用,这也是使离散元模拟结果略小于实验室实验结果的重要原因。但是,从图中推土板受到的动态作用力变化趋势来看,离散元模拟与实验室实验结果基本一致。

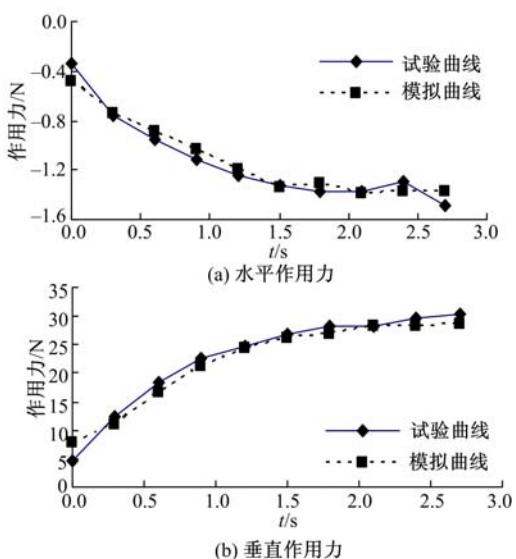


图7 推土板受到土壤的动态作用力变化曲线

Fig. 7 Dynamic forces on the bulldozing plate by soil

从以上土壤动态扰动行为离散元模拟与实验室实验结果的定性和定量对比分析中可以得出,根据土壤颗粒接触非线性力学模型,使用离散元软件 PFC2D® 对波纹形推土板前端土壤动态扰动行为的离散元模拟结果是准确有效的。

#### 3.2 离散元模拟宏细观分析

为了充分理解触土部件复杂表面对土壤动态扰动行为的影响,本文对波纹形推土板前端土壤的不稳定状态(工作时间 0.8 s)和稳定状态(工作时间 2.4 s)的离散元模拟宏细观动态变化过程和影响因素进行了深入分析。

图8为板前端土壤动态扰动行为模拟外观

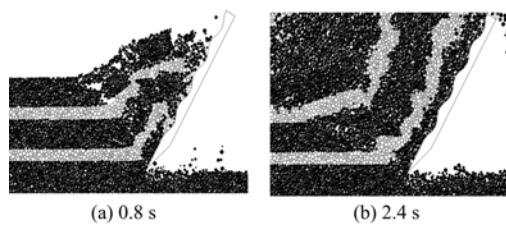


图 8 土壤动态行为模拟外观图

Fig. 8 Dynamic behaviors of soil by DEM

图。从图中可以看出,当土壤处于不稳定状态时,板面前端土壤堆积量逐渐增加,波纹形表面加速板面前端土壤的扰动程度,使土壤破碎;同时,波纹形表面的凹凸结构对接近板面土壤的爬升起到很大的阻碍作用,使接近板面的土壤爬升速度减小。当土壤处于稳定状态时,板面前端土壤堆积量基本稳定,波纹形表面对于土壤的扰动减弱,表现为土壤密实程度变大。当土壤颗粒与波纹形表面相互作用时,波纹形凹凸表面与土壤颗粒之间形成不规则界面,靠近板面的土壤波动情况与波纹形的变化趋势基本一致,增大了土壤的波动频率,这样也使板面土壤不易滑移,板面前端土壤堆积速度较快。另外,波纹形相邻凸处的侧壁对中间凹处土壤颗粒的运动程度产生一定的削减作用,使土层波动幅度降低。

图 9 为板面前端土壤动态速度场,图中线段的长度表示土壤颗粒运动速度的大小,而箭头方向表示土壤颗粒的速度方向。从图中可以看出,不稳定状态下土壤颗粒向上的运动趋势大于稳定状态的情况,并且速度线相对稀疏,这种现象说明不稳定状态时土壤处于堆积状态,并且土体内部土壤颗粒间空隙较大。同时,波纹形表面使速度方向较为杂乱,从而会增大土壤的扰动程度。

图 10 为板面前端土壤动态漂浮颗粒分布图,图中漂浮颗粒表示与其他颗粒没有接触,为处于悬空漂浮状态的土壤颗粒。从图中可以看出,当土壤处于不稳定状态时,板面前端土体内存在较多漂浮土壤颗粒,并且板面附近的漂浮颗粒更多

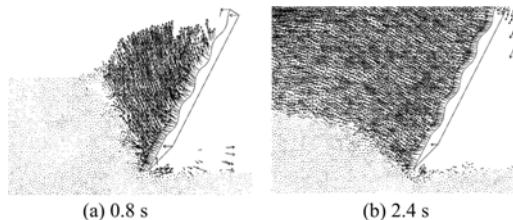


图 9 土壤动态速度场

Fig. 9 Dynamic velocity fields of soil by DEM

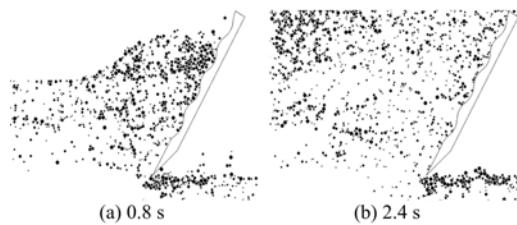


图 10 土壤动态漂浮颗粒图

Fig. 10 Dynamic float particles of soil by DEM

一些,这种现象说明此时土体内部扰动较大,土体内土壤颗粒较为活跃,并且板面的波纹形结构对土壤破碎的影响明显。当土壤处于稳定状态时,板面前端漂浮土壤颗粒减少,只有远离板面的土体自由面出现明显的漂浮颗粒,说明这时土壤内土壤颗粒活动程度减弱,板面前端土壤处于压实状态,只有土体自由面土壤颗粒活动明显。

图 11 为板面前端土壤动态并行约束力场,图中并行约束力分布用穿过并行约束位置的两条直线来表示(黑色线代表压力,灰色线代表拉力),直线方向为并行约束力方向,直线宽度与约束力大小成比例,力矩大小通过改变两直线的宽度来表征。通过并行约束作用模拟土壤颗粒之间的黏性作用,并使离散土壤颗粒团聚形成土块,当模拟土块破碎时,并行约束断裂,与并行约束对应的并行约束力随之消失。从图中可以看出,当土壤处于不稳定状态时,板面前端非断裂土体的并行约束拉力区域较大,并行约束压力区域只出现在铲刃附近,此时土块破碎主要受到推土板切削作用和波纹形板面结构的影响;当土壤处于稳定状态时,板面前端非断裂土体的并行约束压力区域较大,而并行约束拉力区域只出现在土体自由面附近,这时推土板的挤压作用已经变成土块破碎的主要因素。同时发现,土壤由不稳定状态转换到稳定状态时,土块破碎范围变大的速度较快,说明推土板的挤压作用对土块破碎具有较大影响。

以上分析表明,土壤扰动行为变化的离散元

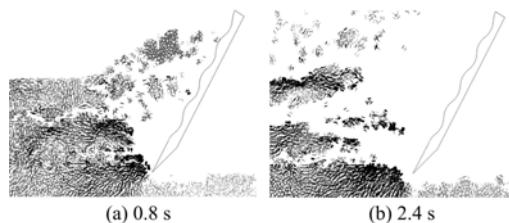


图 11 土壤动态并行约束力场

Fig. 11 Dynamic parallel-bond force fields of soil by DEM

宏细观模拟,能够从土壤内部颗粒的细观运动和颗粒间并行约束力的变化准确分析部件复杂表面结构对土壤动态扰动行为的影响因素和机理。

## 4 结 论

(1)根据液桥对土壤微观力学结构的影响,通过引入表征颗粒间液桥黏性作用的并行约束,并全面考虑土壤颗粒之间的其他相互作用,建立了综合反映土壤颗粒接触、滑移、内聚以及颗粒碰撞能量消散作用的土壤颗粒接触非线性力学模型。

(2)通过离散元分析软件 PFC2D<sup>®</sup>,对波纹形复杂表面推土板前端土壤的动态扰动行为进行了离散元模拟。与实验室实验结果对比表明,离散元模拟能够准确再现触土部件复杂表面前端土壤的外部宏观形态变化过程以及土壤对该触土部件的动态作用力变化趋势。

(3)波纹形表面推土板前端土壤的离散元宏细观模拟,能够通过土壤内部颗粒的细观运动和颗粒间并行约束力的变化准确分析波纹形表面结构对土壤动态扰动行为的影响因素和机理。离散元宏细观模拟为准确分析触土部件复杂表面对土壤动态扰动行为的影响提供了全新的研究手段。

## 参考文献:

- [1] 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1995.
- [2] Asaf Z, Rubinstein D, Shmulevich I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 92: 227-242.
- [3] Momozu M, Oida A, Yamazaki M, et al. Simulation of a soil loosening process by means of the modified distinct element method[J]. Journal of Terra-mechanics, 2003, 39: 207-220.
- [4] Cheng Y P, Bolton M D, Nakata Y. Crushing and plastic deformation of soils simulated using DEM [J]. Geotechnique, 2004, 54(2): 131-141.
- [5] 周健, 池永. 土的工程力学性质的颗粒流模拟[J]. 固体力学学报, 2004, 25(4): 377-382.
- Zhou Jian, Chi Yong. Simulating soil properties by particle flow code[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2004, 25(4): 377-382.
- [6] 姜岩. 土壤[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1983.
- [7] Zhang Rui, Li Jian-qiao. Simulation on mechanical behavior of cohesive soil by distinct element method [J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43 (3): 303-316.
- [8] Lian G P, Thornton C, Adams M J. Discrete particle simulation of agglomerate impact coalescence[J]. Chemical Engineering Science, 1998, 53(19): 3381-3391.
- [9] Yang S C, Hsiau S S. The simulation of powders with liquid bridges in a 2D vibrated bed[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56: 6837-6849.
- [10] 张锐. 基于离散元细观分析的土壤动态行为研究[D]. 长春: 吉林大学生物与农业工程学院, 2005.
- Zhang Rui. Research on the dynamic behavior of soil based on mesoscopic simulation by distinct element method[D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2005.
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions), Version 3.0 [M]. Minneapolis, USA: ICG, 2002.
- [12] 张锐, 李建桥, 许述财, 等. 推土板切土角对干土壤动态行为影响的离散元模拟[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(4): 822-827.
- Zhang Rui, Li Jian-qiao, Xu Shu-cai, et al. Simulation on dynamic behavior of dry soil ahead of the bulldozing plate with different cutting angles by DEM[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(4): 822-827.