

土壤直剪试验的动力学仿真*

杨 望¹ 蔡敢为² 杨 坚²

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004)

【摘要】 采用 ANSYS/LS-DYNA 仿真软件,利用 Lagrange 和 SPH 相结合的方法及修正的 Mohr-Coulomb 屈服准则,建立土壤直剪系统可视化仿真模型,进行 4 种土壤直剪动力学仿真试验,通过回归分析建立了土壤剪切强度与剪切速度的数学模型,研究了土壤剪切破坏过程及剪切速度对剪切强度的影响规律及机理。结果表明,土壤剪切速度大,剪切强度大,剪切模量小时,剪切强度与剪切速度呈三次方关系,剪切模量大时,剪切强度与剪切速度成对数关系;土壤剪切模量对剪切强度影响大,剪切模量大,剪切强度大。

关键词: 土壤 直剪 剪切强度 剪切速度 机理 动力学仿真

中图分类号: S152.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0096-06

Dynamics Simulation of Direct Shear Test

Yang Wang¹ Cai Ganwei² Yang Jian²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China

2. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract

The direct shear system dynamics simulation model was developed on the basis of the modified Mohr-Coulomb yield criterion by using ANSYS/LS-DYNA and a combination of Lagrange and smoothed particle hydrodynamics (SPH). The dynamics simulation experiments of direct shear on four kinds of soil have been carried out. The mathematic models of soil shear strength and shearing speed were established by regression analysis. The research on soil shear failure process and the influence law and mechanism of shearing speed on shear strength was done. The results showed that with shearing speed increasing, shear strength increased. Third-order relationship exists between shear strength and shearing speed with small shear modulus. Logarithm relationship exists between shear strength and shearing speed with large shear modulus. The effect of shear modulus on shear strength is large. The large shear strength is with large shear modulus.

Key words Soil, Direct shear, Shear strength, Shearing speed, Mechanism, Dynamics simulation

引言

剪切速度对土壤剪切强度的影响一直是土壤耕作机械研究的热点,国内外对其在宏观尺度上进行了较多的研究,得到了一些相关的数学模型及结论^[1-7],但采用动力学可视化仿真技术,在微观上研究土壤直剪断裂的动力学过程及对影响剪切强度的速度因素进行研究鲜见报道。为探明直剪断裂的动力学过程及剪切速度对剪切强度的影响机理,本文

采用 ANSYS/LS-DYNA 显式动力学仿真软件建立直剪试验动力学可视化仿真模型,进行动力学仿真,在细观上研究土壤直剪断裂机理,以期为挖拔式块根拔起速度模型的研究、木薯收获机械和其他土壤耕作机械的设计提供参考。

1 土壤直剪仿真模型

1.1 几何模型

根据直剪试验原理和应变控制式直剪仪工作原

收稿日期: 2010-10-22 修回日期: 2010-12-15

* 国家自然科学基金资助项目(51065003)和广西科技创新能力与条件建设项目(09-007-05S015)

作者简介: 杨望,博士生,主要从事甘蔗和木薯收获机械动力学仿真及性能优化研究,E-mail: yanghope@163.com

通讯作者: 杨坚,教授,主要从事农业机械设计及性能优化研究,E-mail: yangokok@gxu.edu.cn

理,为了减少仿真计算时间,对直剪仿真试验装置进行简化,其结构简图如图 1 所示。建模时,取土壤长 100 mm,宽 10 mm,高 200 mm,上、下盒高度均为 100 mm,盒壁厚取 10 mm,为了与土壤耕作条件相近,上盒不封顶。

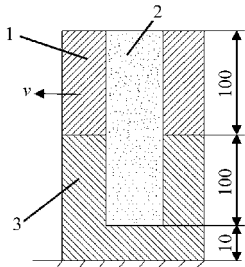


图 1 直剪仿真试验装置结构简图

Fig. 1 Structural diagram of direct shear test
1. 上盒 2. 土壤 3. 下盒

1.2 材料模型

土壤模型: 参照文献[8], 本文采用 MAT147 (MAT_FHWA_SOIL) 作为土壤材料模型, 该模型考虑了应变率效应、孔隙比及孔隙水压力的影响, 其服从修正的 Mohr - Coulomb 屈服准则, 修正后 Mohr - Coulomb 屈服表面表达式为

$$\sigma_y = -p\sin\varphi + \sqrt{J_2K^2(\theta) + A^2\sin^2\varphi - c\cos\varphi} = 0$$

(1)

式中 σ_y ——屈服面 p ——压力
 φ ——内摩擦角
 J_2 ——应力偏张量第二不变量
 $K(\theta)$ ——张量平面角的函数
 A ——D - P 准则系数 c ——粘聚力

土壤直剪试验时,土壤产生大的变形且出现剪切破裂现象,采用一般有限元方法进行动力学仿真,网格出现畸变,因此,本文采用光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics,简称 SPH)方法定义土壤。SPH 法离散化不使用单元,而使用固定质量的可动点,即质点或节点^[9]。SPH 法不用网格,

没有网格畸变,能有效处理大变形问题,模拟连续体结构的破碎、固体的层裂和脆性断裂等现象。SPH 的基础是插值理论,在 SPH 中任一宏观变量(如密度、压力和温度等)能方便地借助于一组无序点上的值表示成积分插值计算得到,各质点相互作用借助插值函数来描述,利用插值函数给出量场在一点处的核心估计值,将连续介质力学的守恒定律由微分方程形式转换成积分形式,进而转换成求和。

SPH 方法中,质点近似函数定义为

$$\Pi^h f(x) = \int f(y) W(x - y, h) dy$$

(2)

其中

$$W(x, h) = \frac{1}{h^n(x)} \omega(x)$$

式中 n ——空间维数 $\omega(x)$ ——辅助函数
 h ——光滑长度,随时间和空间变化

$W(x, h)$ 是尖峰函数,如图 2 所示。SPH 中最常用的光滑核是三次 B-样条,定义为

$$\omega(u) = C \times \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}u^2 + \frac{3}{4}u^3 & (|u| \leq 1) \\ \frac{1}{4}(2 - u)^3 & (1 < |u| < 2) \\ 0 & (|u| \geq 2) \end{cases}$$

(3)

式中 C ——归一化常数量,由空间维数确定

仿真试验时,选取文献[8,10~12]提供的 4 种用于动力学仿真的不同土壤材料参数进行试验,其中,1、2 号土壤剪切模量较小,3、4 号土壤剪切模量较大。1 号土壤为含水率较低的砂土,2 号土壤为含水率较高的粘土,3 号土壤为含水率较低的黄棕壤,4 号土壤为含水率较高的水田粘土。土壤模型的主要材料参数见表 1。

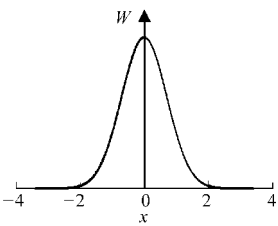


图 2 核函数
Fig. 2 Kernel function

表 1 土壤材料参数

Tab. 1 Soil material parameters

材料序号	土壤密度/kg·m ⁻³	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	内摩擦角 φ /rad	粘聚力 c /kPa	含水率/%
1	2.350×10^3	3.25	1.30	1.100	6.2	3.4
2	1.850×10^3	5.92	2.73	0.401	9.5	35.0
3	2.082×10^3	35.00	20.00	0.436	22.0	3.4
4	1.650×10^3	28.00	18.00	0.436	16.7	25.0

箱体模型: 定义为各向同性线弹性材料,其材料参数密度为 7 800 kg/m³,弹性模量为 2×10^{11} Pa,泊松比为 0.27。

1.3 网格划分及加载

箱体和土壤采用实体单元 SOLID164 建模。网

格划分时,为了保证精度,且节省仿真时间,采用 Sweep 方式进行网格划分,上、下盒分别划分成 260 和 296 个单元;土壤划分成 200 000 个单元,然后通过 ANSYS/LS - DYNA 的前后处理软件 LS - PrePost 把土壤的实体单元转换成 SPH 粒子。下盒的底部

全约束,上盒外表面在 y,z 方向施加约束,盒体和土壤的接触方式选用点面接触。实际土壤直剪试验时,在上盒施加水平向左的恒定速度 v ,建立的三维直剪试验动力学可视化仿真模型如图 3 所示,利用 ANSYS/LS-DYNA 的求解器进行仿真求解。

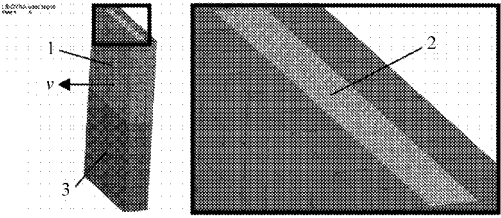


图 3 直剪试验仿真模型

Fig. 3 Direct shear test simulation model
1. 上盒 2. 土壤 3. 下盒

1.4 土壤剪断过程分析

图 4 是 3 号土壤在速度为 0.2 m/s 时直剪过程的剪切力-时间历程图。由图 4 可知,随着上盒的移动量增加,剪切力先快速增大,达到最大值时,出现“驼峰”现象,后迅速降低,和已有的土壤剪切物理试验的曲线变化规律基本一致^[13],表明建立的土壤剪切试验动力学仿真模型合理。图 5 是在剪切方向上土壤横向中截面的各时步应力截图。由图 5 可知,箱体与土壤刚接触时,整个盒体内表面对土壤有挤压作用,但它们之间的作用力较小,土壤应力分布较均匀。随着上盒移动,剪切部位形成纵向宽度 10 mm 左右的剪切带,上盒体对土壤的挤压作用增强,使位于剪切带中部的部分粒子之间失去连结力,出现断裂,剪切力不断增大,出现第 1 个峰值。然后

随着上盒移动量的增加,上盒对土壤的剪切作用进一步加强,剪切带被进一步挤压,失去连结力的部分粒子沿着剪切方向滚动,与周围粒子接触形成挤压作用和摩擦阻力,而其他粒子间的连结同时不断地被直接拉裂,失去连结力的粒子不断增加,导致土壤被剪切破坏,剪力出现第 2 个峰值,出现了如图 4 中所示的“驼峰”现象。最后在上盒的作用下,进一步拉裂剩下的粒子,同时,克服土粒间的摩擦力,使上、下盒的土壤错开,剪力下降,这时位于剪切带中间位置出现明显的滑移面,最后,土壤被剪断。

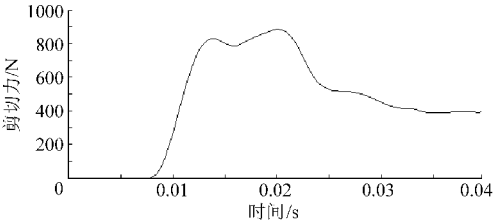


图 4 剪切力-时间历程图

Fig. 4 Relationship between shearing force and time

2 试验方案及结果

试验时,以土壤作为条件因素,剪切速度 v 作为试验因素,以剪切强度为指标,进行单因素直剪仿真试验。由于土壤剪切过程中,土壤剪切面上各部位的应力分布不均,因此,先测定最大剪切力 F_{max} ,后通过公式 $\tau = F_{max}/A$ (A 为剪切方向的土壤水平截面积)求出土壤剪切强度。试验方案及试验结果如

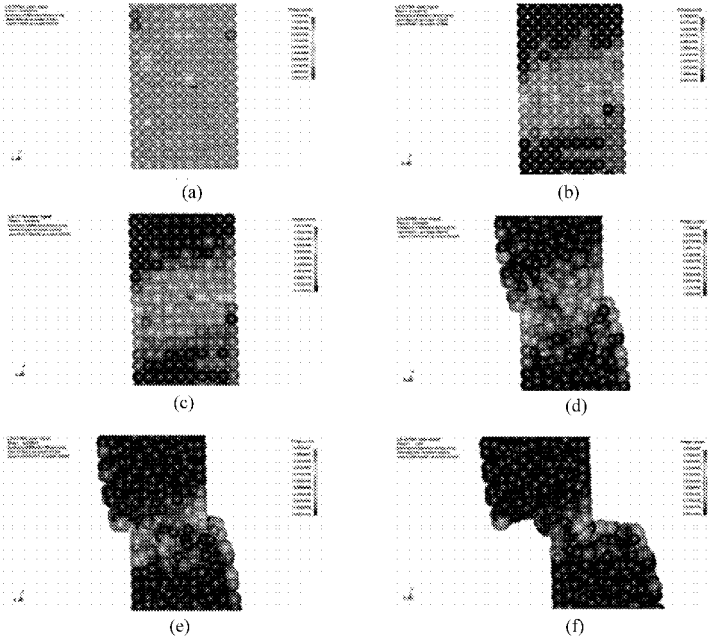


图 5 剪切方向土壤中截面各时步应力图

Fig. 5 Diagram of stress in soil cross-section on shear direction

(a) $t=0.008\ 076\ s$ (b) $t=0.009\ 276\ s$ (c) $t=0.010\ 076\ s$ (d) $t=0.020\ 476\ s$ (e) $t=0.023\ 676\ s$ (f) $t=0.040\ 000\ s$

表 2 所示,其中, $v=0$ 指土工试验中的剪切速度,用静态剪切速度表示,利用公式 $\tau=c+\sigma\tan\varphi$ (σ 为上盒土壤作用在下盒土壤上的正应力) 直接求出静态剪切速度时的土壤剪切强度 τ_0 。

表 2 试验方案及试验结果
Tab. 2 Experimental design and results

试验序号	材料序号	$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	τ/kPa	试验序号	材料序号	$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	τ/kPa
1	1	0	10.82	15	3	0	22.97
2	1	0.1	83.85	16	3	0.1	925.44
3	1	0.2	104.44	17	3	0.2	896.24
4	1	0.4	135.81	18	3	0.4	1 096.80
5	1	0.6	142.78	19	3	0.6	1 211.40
6	1	0.8	243.22	20	3	0.8	1 349.20
7	1	1.0	347.04	21	3	1.0	1 438.60
8	2	0	10.28	22	4	0	17.47
9	2	0.1	150.16	23	4	0.1	814.27
10	2	0.2	159.73	24	4	0.2	1 640.90
11	2	0.4	207.68	25	4	0.4	1 681.20
12	2	0.6	242.50	26	4	0.6	1 923.60
13	2	0.8	299.77	27	4	0.8	2 027.00
14	2	1.0	361.49	28	4	1.0	2 120.90

3 回归分析

文献[14]的研究表明,快速剪切土壤时,土壤的剪切作用由静载和动载两部分叠加而成,因此,为了便于求出剪切强度的回归方程,假设

$$\tau=\tau_0+H(v)$$
 (4)

式中, τ_0 为静态剪切速度时的剪切强度, $H(v)$ 是速度 v 为变量的方程。由式(4)得 $H(v)=\tau-\tau_0$,代入试验数据,得 $H(v)$,后采用 SPSS 统计分析软件对上述数据进行处理,得到 $H(v)$ 的数学模型,并代入式(4),得到 4 种不同土壤的抗剪强度 τ 与剪切速度 v 的数学模型为

$$\tau_1=c_1+\sigma_1\tan\varphi_1+674\,321.6v-1\,257\,261v^2+926\,534.2v^3$$
 (5)

$$\tau_2=c_2+\sigma_2\tan\varphi_2+1\,101\,139v-1\,818\,897v^2+1\,077\,106v^3$$
 (6)

$$\tau_3=c_3+\sigma_3\tan\varphi_3+1\,355\,030+244\,082.8\ln v$$
 (7)

$$\tau_4=c_4+\sigma_4\tan\varphi_4+2\,063\,059+391\,416.9\ln v$$
 (8)

对回归数学模型及回归系数进行检验,结果回归数学模型均在 0.001 水平上高度显著,且回归数学模型的各项系数也达到了 0.004~0.044 的显著水平,表明回归数学模型拟合得好。由上述数学模型可知,对于剪切模量较小的 1 和 2 号土壤,其剪切强度数学模型可表达为 $\tau=c+\sigma\tan\varphi+av-bv^2+gv^3$ 形式,其中,系数 a 、 b 和 g 由土壤性质决定。对于剪切模量较大的 3 和 4 号土壤,其剪切强度数学模型可表达为 $\tau=c+\sigma\tan\varphi+i+j\ln v$ 形式,其中,系数 i 和 j 由土壤性质决定,这与文献[1]的结论一致。表明土壤剪切模量差别大时,剪切强度的数学模型表达形式不同。剪切模量小时,剪切强度 τ 与剪切速度 v 呈三次方关系;剪切模量大时,剪切强度 τ 与剪切速度 v 呈对数关系。土壤剪切模量对 τ 影响大。

4 因素影响分析

图 6 是运用 MathCAD 软件对 4 个数学模型进

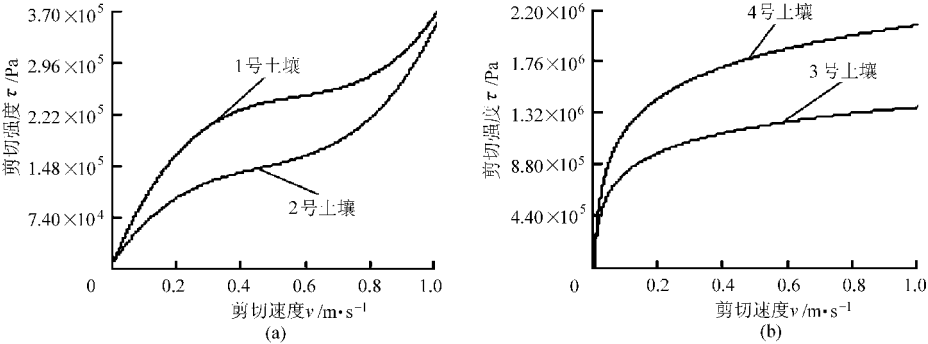


图 6 剪切强度与剪切速度的关系曲线
Fig. 6 Relationship between shear strength and shearing speed

行模拟计算获得的土壤剪切强度与剪切速度的关系曲线。由图6可知,剪切模量差别大的两组土壤,其剪切强度差别大。剪切模量大,剪切强度大,反之相反。

图7是各剪切速度下最大剪力时在剪切方向上土壤横向中截面的应力图。

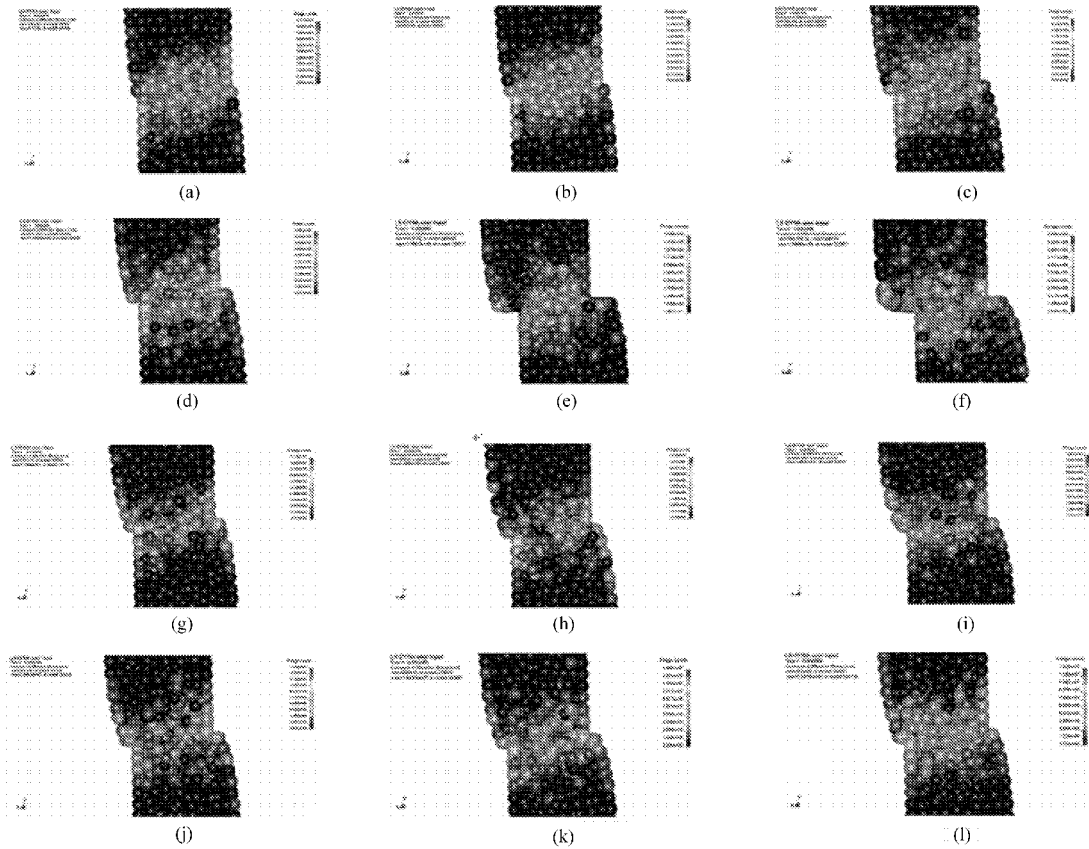


图7 最大剪力时的应力图

Fig.7 Diagram of stress on maximum shearing force

(a) $v=0.1\text{ m/s}$, 1号土壤 (b) $v=0.2\text{ m/s}$, 1号土壤 (c) $v=0.4\text{ m/s}$, 1号土壤 (d) $v=0.6\text{ m/s}$, 1号土壤 (e) $v=0.8\text{ m/s}$, 1号土壤
(f) $v=1.0\text{ m/s}$, 1号土壤 (g) $v=0.1\text{ m/s}$, 3号土壤 (h) $v=0.2\text{ m/s}$, 3号土壤 (i) $v=0.4\text{ m/s}$, 3号土壤 (j) $v=0.6\text{ m/s}$, 3号土壤
(k) $v=0.8\text{ m/s}$, 3号土壤 (l) $v=1.0\text{ m/s}$, 3号土壤

由图6可知,土壤的剪切强度随着剪切速度增大而增大,3号和4号土壤的剪切强度比1和2号土壤大很多。其原因由图7可知,随着剪切速度的增加,瞬间同时被拉裂的粒子间连结增多,故随着剪切速度的增大,剪切强度增大;由于3号和4号土壤的剪切模量较大,土壤变形较难,土壤的破坏以土粒间连结被直接拉裂为主,瞬间同时被拉裂的粒子数多,而1和2号土壤的剪切模量较小,土壤变形较易,瞬间同时被拉裂的粒子数少,故3号和4号土壤的剪切强度比1号和2号土壤大很多。

由图6a剪切模量较小的1和2号土壤可知,剪切速度 v 小于 0.4 m/s 时, τ 随着 v 增大而快速增大,当 v 在 $0.4\sim0.6\text{ m/s}$ 之间时, τ 随 v 增大而平缓增大, v 大于 0.6 m/s 后, τ 随 v 增大,快速增大。其原因由图7可知, v 在 $0\sim0.4\text{ m/s}$ 之间,当 v 较小时,出现明显剪切带到粒子间连结断裂的时间间隔相对较长,瞬间同时被拉裂的粒子数少,且刚断裂的

粒子与未拉裂粒子之间的挤压和摩擦作用不强,故剪切强度较小,但随着 v 的增大,出现明显剪切带到粒子间连结断裂的时间间隔相对变短,瞬间同时被拉裂的粒子数增多,且刚断裂的粒子与未拉裂粒子之间的挤压和摩擦作用增强,粒子向上方运动,粒子运动阻力增大,故随着 v 的增大,剪切强度快速增大;剪切速度 v 在 $0.4\sim0.6\text{ m/s}$ 之间,当 $v=0.6\text{ m/s}$ 时,虽然土壤被挤压变形比 $v=0.4\text{ m/s}$ 时明显,且出现明显剪切带到粒子间连结断裂的时间间隔相对短一些,土壤被直接拉裂严重,但粒子间出现明显空隙,摩擦阻力减小,故剪切强度随 v 的增大而平缓增大;当剪切速度 v 大于 0.6 m/s 后,随着 v 的增大,出现明显剪切带到粒子间连结断裂的时间间隔明显变短,瞬间同时被拉裂的粒子数明显增多,此时上盒的土壤拉裂下方土壤面积变大,虽然由于粒子间出现明显空隙,摩擦阻力减小,但综合结果随 v 的增大,剪切强度较快增大。

由图 6b 剪切模量较大的 3 和 4 号土壤可知,剪切速度 v 小于 0.2 m/s 时,随 v 的增大,剪切强度快速增大,但 v 大于 0.2 m/s 后,剪切强度增速平缓。其原因由图 7 可知,剪切速度 v 在 0 ~ 0.2 m/s 之间,当 v 增大时,出现明显剪切带到粒子间连结断裂的时间间隔变短,瞬间同时被拉裂的粒子数增多,且粒子与周围刚断裂的粒子之间的挤压和摩擦作用增强,粒子向上方运动,粒子运动阻力增大,故随着 v 的增大,剪切强度快速增大;在 $v = 0.4$ m/s 之后,随着 v 的增大,虽然土壤产生的弯曲变形有一定变化,但土壤剪切破坏的情况变化不大,故剪切强度增大平缓。

5 结论

(1) 采用 SPH 法定义土壤,建立土壤直剪系统

动力学可视化仿真模型,能有效克服土壤产生大变形引起网格畸变的问题。

(2) 土壤被挤压变形,土粒间的连结被直接拉裂及土粒间的挤压、摩擦引起土粒间的拉裂是土壤断裂的主要原因;随着剪切速度的增大,瞬间同时土壤粒子被拉裂的数目增多,土壤剪切强度增大。

(3) 剪切模量差别大的土壤,其剪切强度与剪切速度关系的数学模型形式不同,剪切模量小的土壤,剪切强度与剪切速度呈三次方关系;剪切模量大的土壤,剪切强度与剪切速度呈对数关系。

(4) 土壤剪切模量对剪切强度影响大,剪切模量大,土壤较难变形,土壤的破坏以土粒间连结被直接拉裂为主,瞬间同时被拉裂的粒子数多,剪切强度大;剪切模量小,土壤较易变形,瞬间同时被拉裂的粒子数少,剪切强度小。

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 姬长英,潘君拯. 湿软土壤剪切应力-剪切速度-时间关系及其应用(第2报):湿软土壤的剪切应力-剪切速度-时间关系[J]. 农业工程学报,1994,10(4):26~31.
- 3 Blunden B G, McLachlan C B, Kirby J M. A high-speed shear box machine[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 56(1):81~87.
- 4 Wheeler P N, Godwin R J. Soil dynamics of single and multiple tines at speeds up to 20 km/h[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1996,63(3):243~250.
- 5 Onwualu A P, Watts K C. Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tools[J]. Soil & Tillage Research, 1998, 48(4):239~253.
- 6 Mootaz Abo-Elnor, Hamilton R, Boyle J T. 3D dynamic analysis of soil-tool interaction using the finite element method[J]. Journal of Terramechanics, 2003, 40(1):51~62.
- 7 Karmakar S, Ashrafizadeh S R, Kushwaha R L. Experimental validation of computational fluid dynamics modeling for narrow tillage tool draft[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(5):277~283.
- 8 Lewis B A. Manual for LS-DYNA soil material model 147[R]. Department of Transportation: Federal Highway Administration, U. S. A., 2004.
- 9 李裕春,时党勇,赵远. ANSYS 11.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- 10 丁峻宏,金先龙,郭毅之,等. 土壤切削大变形的三维数值仿真[J]. 农业机械学报,2007,38(4):118~121.
Ding Junhong, Jin Xianlong, Guo Yizhi, et al. Study on 3-D numerical simulation for soil cutting with large deformation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4):118~121. (in Chinese)
- 11 马爱丽,廖庆喜,田波平,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的螺旋刀具土壤切削的数值模拟[J]. 华中农业大学学报,2009,28(2):248~252.
Ma Aili, Liao Qingxi, Tian Boping, et al. Numerical simulation of soil cutting by spiral cutter on the basis of ANSYS/LS-DYNA[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2009, 28(2):248~252. (in Chinese)
- 12 周明,张国忠,许绮川,等. 土壤直角切削的有限元仿真[J]. 华中农业大学学报,2009,28(4):491~494.
Zhou Ming, Zhang Guozhong, Xu Qichuan, et al. Study on viscous soil rectangular cutting FEM simulation[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2009,28(4):491~494. (in Chinese)
- 13 孙一源,高行方,余登苑. 农业土壤力学[M]. 北京:农业出版社,1985.
- 14 薛守义. 高等土力学[M]. 北京:中国建材工业出版社,2007.