

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.063

压实对土壤应力分布的影响仿真分析*

赵振家¹ 邹猛¹ 薛龙² 魏灿刚¹ 李建桥¹

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 华东交通大学机电工程学院, 南昌 330013)

【摘要】 机械土壤压实是保护性耕作急需解决的难题之一,了解压实土壤内部应力分布是减轻机械土壤压实的关键研究之一。采用离散单元法对车轮土壤压实过程进行了仿真模拟,结果表明:压实后不同耕深的土壤硬度增大,随深度变化明显,且随着土壤压实次数增多,土壤颗粒接触力增大,纵向影响域加深;车轮前3次通过,土壤硬度增加趋势明显,超过3次后土壤硬度虽有增加,但是增加程度不明显,层深为15 cm时,压实3次的土壤硬度相比没压实的增加了155.2%,而压实6次比压实3次仅增加了22.9%。研究成果对田间耕作管理措施的制定以及行走机构的优化设计提供了参考。

关键词: 土壤压实 硬度 应力分布 仿真**中图分类号:** S152.9; S232.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)S0-0311-03

Simulation Analysis of Effect of Compaction on Soil Stress Distribution

Zhao Zhenjia¹ Zou Meng¹ Xue Long² Wei Can'gang¹ Li Jianqiao¹

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China

2. School of Mechatronics Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract

The process of wheel compacted soil was simulated by using DEM. The results showed that after the compaction, soil hardness of different depths increased and changed obviously with depth. With the frequency increased, soil particle's contact force increased and longitudinal influence domain deepened. When wheel passed in the first three times, the increasing trend of soil's hardness was obvious. When wheel passed more than three times, the soil's hardness also increased. But the increasing was not obvious. When the layer deep was 15 cm, the hardness of compacted soil would increase by 155.2% when compared with the soil without compaction, the soil compacted six times would only increase by 22.9% when compared with the one compacted three times.

Key words Soil compaction, Hardness, Stress distribution, Simulation

引言

机械作业尤其是拖拉机的应用,对提高农业生产效率、推进农业集约化进程起到了积极的推动作用,但拖拉机在田间作业的同时对土壤进行了碾压,造成土壤密度增加,土壤孔隙率降低^[1],水渗透能力降低,致使土壤侵蚀加重,机耕阻力增加,作物根

系生长受阻,进而导致作物产量降低,投入加大,土壤环境受到破坏,形成土壤机械压实^[2]。

我国大中小拖拉机类型繁多,在国产拖拉机上很少采用减轻机械压实的措施^[3-4]。如国内广泛使用的小型四轮拖拉机,尽管单机质量较轻,却存在着轮胎窄、轮胎压力较高、耕作效率低、进地次数多、轮迹覆盖率高等问题,土壤压实问题不可忽视。表层

收稿日期: 2012-06-30 修回日期: 2012-07-18

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110061120050)、吉林省科技发展计划资助项目(201101024)、吉林大学基本科研业务费课题(Z201102)和工程仿生教育部重点实验室开放项目(K201206A)

作者简介: 赵振家,硕士生,主要从事车辆地面力学研究,E-mail: zhaozhenjia126@126.com

通讯作者: 邹猛,副教授,博士,主要从事车辆地面力学和工程仿生研究,E-mail: zoumeng@jlu.edu.cn

(耕层)的土壤压实虽可通过耕作适当降低,但心土层的压实则难以消除^[5]。因此,应运用适当的方法对现行机械耕作压实特征及其危害进行正确的分析和评价,在农业机械设计和制造时充分采用减轻或避免机械压实的技术策略,才能为避免或减轻土壤机械压实提供保障,避免土壤资源被破坏^[6-11]。

本文通过离散元法模拟车轮土壤压实过程,分析车轮压实对土壤硬度的影响,探讨压实条件下土壤内部应力分布和土壤颗粒接触力。

1 仿真

国际上通常用土壤硬度来描述土壤被压实的程度,测量土壤硬度的目的是从中找到紧实度大的地域,便于实行有效的耕作。

通过贯入试验测量土壤硬度,不能直观地分析压实土壤内部的受力分布和土壤颗粒间接触力情况。因此,采用离散单元法模拟硬度贯入试验,并分别测试了不同压实次数下土壤硬度和应力分布。仿真时首先产生模拟土壤,参数如表1所示。

表1 模拟土壤颗粒接触力学模型细观参数

Tab.1 Parameters of DEM model of soil

参数	数值
摩擦因数	0.75
接触法向刚度/ $N \cdot m^{-1}$	2.5×10^6
接触切向刚度/ $N \cdot m^{-1}$	1×10^6
法向临界阻尼比	0.84
切向临界阻尼比	0.62
并行约束法向刚度/ $Pa \cdot m^{-1}$	2.5×10^7
并行约束切向刚度/ $Pa \cdot m^{-1}$	1.0×10^7
并行约束强度/ Pa	7.5×10^5
颗粒半径/ mm	0.50 ~ 0.85

图1为车轮土壤压实离散元仿真模拟。模拟土壤的长为1200 mm,深为300 mm,离散元模拟土壤时生成颗粒数为5万个。车轮由标准墙按顺时针生成,外侧为有效的活动面,车轮向右滚动,直径为600 mm,法向载荷为2000 N,前进速度为10 m/s。

车轮通过后,测量压实土壤的硬度。硬度仪锥

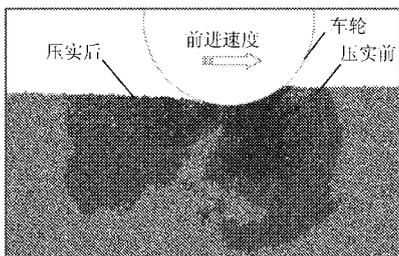


图1 车轮土壤压实离散元仿真

Fig.1 DEM simulation of wheel soil compaction

头顶角为 30° ,压入速度为3 cm/s。图2a为没有车轮压实的土壤硬度贯入仿真结果,图2b为压实2次后的土壤硬度贯入仿真结果。

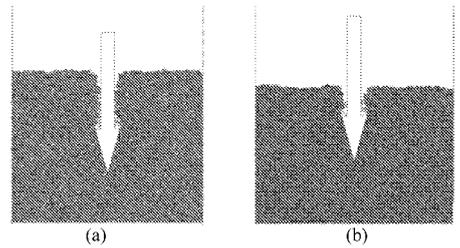


图2 离散元模拟土壤硬度测试

Fig.2 DEM simulation of soil hardness test

(a) 没压实 (b) 压实2次

离散元模拟结果的可靠性与准确性由试验进行验证,试验条件与离散元模拟一致,参数为:轮上载荷2000 N,前进速度10 m/s,车轮通过后,测量压实土壤的硬度。试验采用SC-900土壤硬度计测量土壤硬度,测试土壤为吉林大学工程仿生教育部重点实验室土槽土,图3为贯入深度-土壤硬度关系曲线,离散点为试验值,实线为仿真值。由图3可知,模拟结果与试验结果趋势基本一致,即在该条件下仿真结果可信。

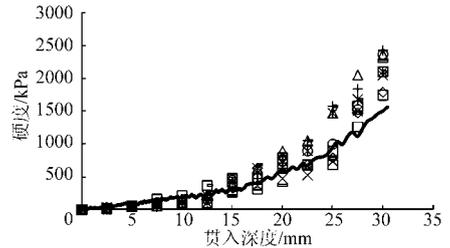


图3 土壤硬度仿真与试验结果

Fig.3 Simulation and experimental results for soil hardness

2 结果分析

图4为离散元仿真得到的贯入深度-土壤硬度曲线。由图4可知,没压实的松软土壤硬度低,随深度变化缓;而压实后的土壤硬度高,且斜率大,土壤越深硬度越大。

土壤硬度对作物生长的影响很大:当硬度大于1 MPa时,农作物根系生长速度减慢;且随着硬度增加,影响增大,直至停止生长(当硬度大于2 MPa时),本文中土壤深度为20 cm时,土壤的硬度为687.4 kPa,适于作物生长,压实1次时为1422.7 kPa,作物生长减缓,压实3次时为1867 kPa,生长更加缓慢。

图5为不同压实次数对土壤硬度的影响。由图可知,随着土壤压实次数的增多,不同层深的土壤硬度增大,车轮前3次通过,土壤硬度增加趋势明显,超过3次后土壤硬度虽有增加,但是增加程度不明

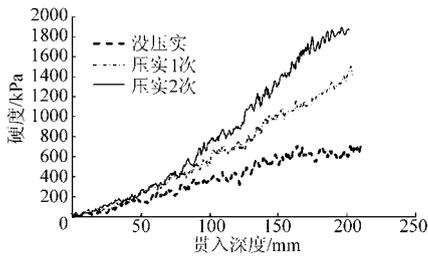


图4 贯入深度-土壤硬度曲线

Fig. 4 Curves of penetration depth and soil hardness

显。层深为 15 cm 时,压实 3 次的土壤硬度相比没压实增加了 155.2%,而压实 6 次比压实 3 次仅增加了 22.9%。

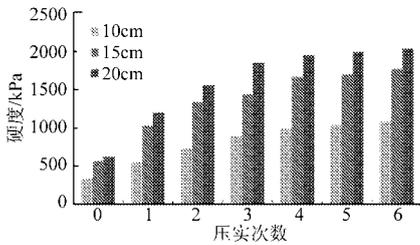


图5 不同层深、不同压实次数时的土壤硬度

Fig. 5 Soil hardness with different depths and compaction times

图6为轮下压实土壤的应力分布,最内层压力为 80 kPa,中间层为 40 kPa,外层为 20 kPa。由图6可知,随着压实次数的增多,轮下土壤更加密实,土壤受压实影响域增大,第1次压实影响深度为 0.21 m,第2次压实的影响深度为 0.32 m,第3次压实的影响深度为 0.41 m,第4次压实的影响深度为 0.43 m。在横向上,车轮对压实土壤内部应力影响也更加宽,由压实1次的 0.58 m,逐渐增加到压实2次的 0.69 m,

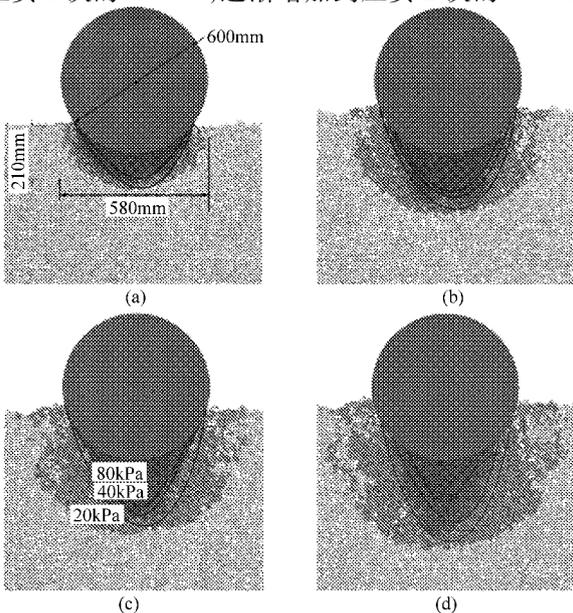


图6 轮下压实土壤应力分布

Fig. 6 Soil stress distribution under wheel compaction

(a) 压实1次 (b) 压实2次 (c) 压实3次 (d) 压实4次

压实 3 次的 0.72 m,压实 4 次的 0.74 m。

图 7a ~ 7c 为模拟硬度仪压杆插入土壤中土壤应力分布情况,由图可知,车轮通过使得土壤下沉、密度增加、孔隙率降低、机械阻力增加。图 7d ~ 7f 为压实后土壤内部颗粒之间的接触力,分析得出,随着压实次数的增加,颗粒更加紧密,接触力增大。

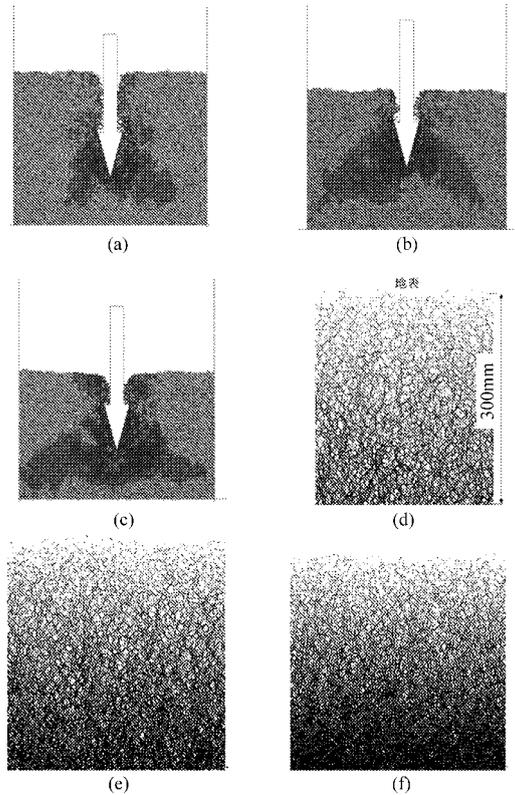


图7 压实土壤内应力和接触力分布

Fig. 7 Soil's stress and contact force under wheel compaction

(a) 没压实土壤应力 (b) 压实1次土壤应力
(c) 压实2次土壤应力 (d) 没压实土壤接触力
(e) 压实1次土壤接触力 (f) 压实2次土壤接触力

3 结论

(1) 没压实的松软土壤硬度低,随深度变化缓;而压实后的土壤硬度高,且变化明显,深度越大土壤硬度越大。

(2) 随着土壤压实次数的增多,不同层深的土壤硬度增大,车轮前3次通过,土壤硬度增加趋势明显,超过3次后土壤硬度虽有增加,但是增加程度不明显。层深为 15 cm 时,压实 3 次的土壤硬度相比没压实增加了 155.2%,而压实 6 次比压实 3 次仅增加了 22.9%。

(3) 随着土壤压实次数增多,土壤颗粒接触力增大,纵向影响域加深;第1次压实影响深度为 0.21 m,第2次压实影响深度为 0.32 m,第3次压实影响深度为 0.41 m,第4次压实影响深度为 0.43 m。

参 考 文 献

- 1 张秀丽,郑浩峻,陈恳,等. 机器人仿生学研究综述[J]. 机器人,2002,24(2):188~192.
Zhang Xiuli, Zheng Haojun, Chen Ken, et al. Research on robotic bionics[J]. Robot, 2002, 24(2):188~192. (in Chinese)
- 2 王立权,孙磊,陈东良,等. 仿生机器蟹样机研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2005,2(5):191~195.
Wang Liquan, Sun Lei, Chen Dongliang, et al. A bionic crab like robot prototype[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005, 2(5):191~195. (in Chinese)
- 3 袁鹏. 仿生机械蟹步行机理分析及控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2003.
Yuan Peng. Research on walking mechanism analysis and control system of a crab-like biologically inspired robot[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2003. (in Chinese)
- 4 Perry M J, Tait J, Hu J, et al. Skeletal muscle types in the ghost crab, *Ocypode quadrata*: implications for running performance[J]. The Journal of Experimental Biology,2009,212(5):673~683.
- 5 Zhang Yan, Yu Minsu, Liang Yang. Experimentation of fish swimming based on tracking locomotion locus[J]. Journal of Bionic Engineering,2008,5(3):258~263.
- 6 Zhang Y, Huang H, Liu X Y, et al. Inematics of terrestrial locomotion in mole cricket *Gryllotalpa orientalis*[J]. Journal of Bionic Engineering,2011,8(2):151~157.
- 7 Dickinson M H, Farley C T, Full R J, et al. How animals move: an integrative view[J]. Science,2000, 288(5463):100~106.
- 8 Weinstein R B. Locomotor behavior of nocturnal ghost crabs on the beach: focal animal sampling and instantaneous velocity from three-dimensional motion analysis[J]. The Journal of Experimental Biology,1995,198(4):989~999.
- 9 Full R J, Jindrich D L. Dynamic stabilization of rapid hexapedal locomotion[J]. The Journal of Experimental Biology,2002, 205(18):2 803~2 823.
- 10 陈秉聪. 步行车辆理论及脚踝设计[M]. 北京:机械工业出版社,1991.
- 11 Full R J, Weinstein R B. Integrating the physiology, mechanics and behavior of rapid running ghost crabs: slow and steady doesn't always win the race[J]. AMER Zool,1992,32:382~395.
- 12 Blickhan R, Full R J. Locomotion energetic of the ghost crab II. Mechanics of the centre of mass during walking and running[J]. The Journal of Experimental Biology,1987,130(1):155~174.
- 13 Barnes W J P. Leg co-ordination during walking in the crab, *Uca pugnax*[J]. Journal of Comparative Physiology A,1975, 96(3):237~256.

(上接第 313 页)

参 考 文 献

- 1 Raper R L. Agricultural traffic impacts on soil[J]. Journal of Terra Mechanics, 2005, 42(3~4): 259~280.
- 2 张兴义,隋跃宇. 土壤压实对农作物影响概述[J]. 农业机械学报,2005,36(10):161~164.
Zhang Xingyi, Sui Yueyu. Summarization on the effect of soil compaction on crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10):161~164. (in Chinese)
- 3 孙忠英,李宝筏. 农业机器行走装置对土壤压实[J]. 农业机械学报,1998,29(3):172~174.
- 4 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京:科学技术出版社,1995.
- 5 张兴义,隋跃宇. 农田土壤机械压实研究进展[J]. 农业机械学报,2005,36(6):122~125.
Zhang Xingyi, Sui Yueyu. International research trends of soil compaction induced by moving machine during field operations [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(6): 122~125. (in Chinese)
- 6 Hamza M A, Anderson W K. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions [J]. Soil & Tillage Research, 2005, 82(2):121~145.
- 7 Boivin P, Schaffer B, Temgoua E, et al. Assessment of soil compaction using soil shrinkage modeling: experimental data and perspectives [J]. Soil & Tillage Research, 2006, 88(1~2): 65~79.
- 8 Emmanuel C C, Vilas M S. Modeling compaction in agricultural soils [J]. Journal of Terramechanics, 2002, 39(2): 71~84.
- 9 Aragon A, Garcia M G, Filgueira R R, et al. Maximum compatibility of Argentine soils from the proctor test [J]. Soil and Tillage Research, 2000, 56(3~4): 197~204.
- 10 Alexandr G. Tire load rating to reduce soil compaction [J]. Journal of Terramechanics, 2003, 40(2): 97~115.
- 11 Botta G F, Becerrac A T, Tourn F B. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 103(2): 381~386.