

农业土壤压实向题文集

周一鸣 主编

北京农业机械化学院编印

一九八四年十月

农业土壤压实问题文集

周一鸣 主编

北京农业机械化学院编印

一九八四年十月

前 言

农业土壤的压实是广大农民、农业科技工作者以及农业机器科研、设计、制造和使用部门都十分关注的一个重要问题。

农业机械化程度和水平的不断提高，一方面固然可以获得更高的生产率和作业质量，但另一方面也使农田土壤受到更加严重的压实。农业土壤被压实会给农作物的产量、灌水、排水、水的渗透、整地质量以及农业机械的耕作阻力等带来一些问题，其后果不容忽视。

多年来，农业机械化水平较高的美、苏、英、日、西德、加拿大和瑞典等国，对农业土壤的压实问题进行了大量的研究，取得了不少成果。我国近些年也开展了对这一问题的试验研究。

为了便于有关人员了解国内外对于农业土壤压实问题的研究成果，我院拖拉机教研室编辑了这本《农业土壤压实问题文集》。

本集共选载了26篇文章。其中大量的是国外文献资料的译文，也有本院拖拉机教研室近几年的研究成果。选题时着重考虑近几年发表的论著，也照顾到某些早期发表的有价值的文献资料。

本集由周一鸣副教授担任主编。翻译工作主要由本院拖拉机教研室的教师担任，也有本院其他教研室教师提供的稿件。所有文章最后均经主编审校定稿。为了节省篇幅，对有些外文资料采取了编译和摘译方式。原文中的参考文献均省略。

敬请读者对本文集的选题、内容和译校质量等方面提出批评和建议。

编 者

1984年10月

目 录

✓ 农业土壤压实问题及其研究概况

.....余 群 (1)

✓ 土壤-机器系统研究中的土壤应变测量法

.....余 群 喻谷源 贺祖年 高大水 焉云和 (7)

✓ 水平载荷对土壤的压实作用

.....“拖拉机行走机构与土壤相互作用”课题组 (12)

拖拉机轮胎下压力分布和土壤压实的基本原理

.....Walter Soehne (21)

农业机械引起的土壤压实

.....William J. Chancellor (32)

拖拉机行驶时土壤中压力的研究

.....伊佐 务 (38)

农业拖拉机和农业机器对土壤的压实及其评价方法

.....М. И. Ляско (86)

重型拖拉机和车辆的土壤压力

.....Ingo Bolling等 (94)

轮式行走系统对土壤的作用

.....В. В. Кацыгин等 (100)

轮式行走机构压实土壤的分析和计算

.....Д. И. Зопогаревская (106)

机器行走系统对土壤的压实

.....В. Г. Шевцов (114)

不同应力路径引起的非饱和土壤的压实

.....Lalit Kumar等 (117)

用方差分析方法研究不同拖拉机对其轮辙的土壤密度的影响

.....А. М. Гуревич等 (127)

车辆行驶速度对土壤压实的影响

.....J. V. Stafford等 (131)

农作物栽培机械化和土壤压实问题

.....П. И. 斯洛博久克等 (143)

土壤结构与玉米产量

.....F. Taylor (等148)

农业拖拉机行走系统对土壤压实和大麦产量的影响

.....M. И. 利亚斯科等 (153)

土壤压实对根系生长的影响

.....R. Q. Cannell (159)

压实和烂根病对豌豆生长及产量的影响

.....G. S. V. Raghavan等 (165)

农业土壤的力学性质

.....D. R. P. Hettiarachchi等 (170)

混合土壤的压实特性

.....C. E. Johnson等 (186)

降低轮胎的接地比压

.....Mike Dwyer (191)

降低接地压力的评比竞赛活动

..... (196)

采用混凝土轨道技术研究土壤压实和施肥方法对春大麦生长的影响

.....F. Pollard等 (198)

射线技术在土壤压实参数测量上的应用

.....B. D. Soane等 (208)

预测越野车辆通过不同类型土壤时引起的土壤压实的数学模型

.....G. S. V. Raghavan等 (217)

农业土壤压实问题及其研究概况

余 群

近年来农业机械化水平较高的美、苏、英、加、西德等国已经认识到农业土壤压实所造成的严重后果。这种后果表现为耕作层和犁底层的土壤物理机械性质、理化性质和水、肥、气等状况的变化，致使肥力减退、作物生长受到影响而造成减产。另外，被压实的土壤还使农具的阻力增大，功率消耗和燃油消耗相应增大以及工作部件的磨损加剧等等。根据美、苏、瑞典等国有关部门的估计，他们每年因土壤压实造成的损失达数亿美元。因此，近年来世界各国的农业车辆和机具的设计、制造、使用部门以及农业、生物、土壤、农业经营管理部门都十分关心并协同研究如何防止和减轻农业土壤压实的问题。我国农业机械化水平还不高，但根据初步调查和试验的结果，土壤压实的后果也是严重的，应及早引起有关部门的重视。

一、农业土壤压实的评价指标

国外早在畜耕时期就有人提出关于耕畜践踏耕地所造成的土壤压实问题，但直到五十年代，随着拖拉机和农业机具的总重量逐年增加，压实的后果日趋严重，才开始受到有关方面的重视并进行研究，逐渐成为“机器-土壤-作物”系统研究的重要方面。它的主要研究任务是探索农业车辆和机具的行走部分和工作部件与土壤相互作用时，土壤的力学特性、物理机械性质、生物理化性质的变化规律。研究这些性质的变化对作物生长条件和产量的影响以及对农业机器行走部分和工作部件性能的影响。并在此基础上提出预测农业土壤压实的理论和方法，找出减轻压实的途径。

多年以来，为了揭示农业土壤压实的机理，研究者曾进行过大量的工作。由于压实问题的复杂性，压实的机理至今尚未完全弄清楚。但一般认为土壤是孔隙体，由土壤固相形成骨架，其间有各种不同的孔隙，细的毛细管孔隙容纳水，大的非毛细管孔隙容纳空气。土壤受外载引起容积发生变化时，实际上是上述三相的变化和互相转化。表现在：（1）土粒受压缩；（2）孔隙内的液相和气相被压缩；（3）孔隙内液相和气相的变化和相互转化；（4）土粒的重新排列。大多数人认为其中（3）、（4）两项是主要的。还有人提出未饱和粒状土壤的土粒间相互滚动和移动所产生的土粒的重新排列是影响土壤压实的主要因素。质地良好的土壤，由于有较多的土粒相互接触侧向的支承面积大和抗剪强度大，因而不容易被压实。

一般采用土壤容重作为评价土壤压实程度的指标：

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma_s}{1+e}$$

式中:

γ_d ——土壤容重;
 W_s ——烘干的土样重量;
 V ——土壤的容积;
 γ_s ——土壤干比重;

$$e = \frac{V_v}{V_s} \text{——孔隙比}$$

其中: V_v ——孔隙的容积;

V_s ——固相的容积。

这样, 土壤的孔隙度 (n) 可用下式表示:

$$n = \frac{e}{1+e}$$

用土壤容重来表示土壤压实的程度是合理的, 它反映了土壤孔隙度的大小, 因此在一定程度上反映了土壤中的水、气、肥的状况和水、气的渗透性等特性。但也有人认为用单一的指标难以说明各种不同质地的土壤的压实程度, 建议除了土壤容重外再附加其它的指标。

二、国外“农业土壤压实”问题的研究概况

国外从五十年代起, 逐渐重视农业土壤的压实问题。拖拉机和农业机械的设计、制造和使用部门为了寻求减轻压实的途径, 希望能找到把土壤压实与车辆和机具的结构参数及使用参数联系起来的指标或预测方程。为此, 各国学者和研究人员长期以来进行了大量的试验研究、统计分析和理论研究工作。概括起来, 这些研究工作按研究的方法可分为两类。

第一类以土力学 (包括经典土力学、土壤临界状态理论和流变学) 和室内土壤测试仪器 (土壤三轴仪等) 为基础, 寻求土壤受外载时内部的应力-应变 (或应力-容重) 之间的经验公式、半经验公式和理论公式, 以此来判断土壤实际的压实问题。属于这一类的有:

关于土壤孔隙度与表面压力间的关系式:

$$n = A \lg \sigma + G$$

式中: n ——土壤的孔隙度; A ——试验常数; σ ——最大正应力 (或表面压力); G ——土壤的初始孔隙度。

这是 W. Söhne 在单轴试验装置上进行试验时所得到的关系式。直到现在还为人所沿用。W. Söhne 认为压实仅取决于最大主应力。但 W. J. Chancellor 等人通过射线装置发现, 单轴试验时最大的土壤压实没有出现在最大主应力的地方。另外 A. C. Bailey 人指出, 当应力的边界条件为零时上式失去意义, 因此近年来提出了下列关系式:

$$\varepsilon_v = (A + B \sigma_h) (1 - e^{-C \sigma_h})$$

式中: ε_v ——线容积应变; σ_h ——水静压力 ($\sigma_h = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$); A 、 B 和 C 为试验系数。作者用大量的室内三轴试验来验证公式的适用性, 但也承认该公式的缺点是需要

复杂的非线性拟合方法,需要确定的系数较多,而且系数值受土壤水分的影响。

Vanden Berg 等人根据静载试验的数据,建立起土壤容重与应力张量间的关系,指出平均正应力与容重变化量的关系最密切。

Bodman 和 Rubin 的实验说明,对土壤表面施加剪切和法向两种应力与只施加同样大小的法向应力相比较,前者不但增大了主应力的大小,而且改变了主应力的方向,使它不再垂直于加载的界面。由于剪切应力的存在,明显地增加了土壤的压实程度。Harris 也认为最大剪切应力与容重有最大的相关系数。

L. Kumar 和 J. A. Weber 等人利用改进的三轴仪进行试验。土样制成长方形,在长轴方向上加 σ_1 ,其余两个方向各加 σ_2 和 σ_3 ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$)。先加静水压,然后再加偏载直至屈服为止。他们的结论是,土壤在卸载一再加载过程中要引起附加的体应变,主应力轴旋转也要引起附加的体积变化。中间主应力 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时,加偏应力至屈服引起的体积变化最大,当 $\sigma_2 = \sigma_1$ 时,体积变化最小。

除了以上应用经典土力学研究外,英国 Newcashes 大学的 A. R. Reece 等人认为,由于轮胎与土壤相互作用过程的复杂性,应用现有的经典土力学来解决土壤压实问题是有困难的。因此推荐应用剑桥学派提出的土壤临界状态理论研究非饱和的农业土壤的压实问题。A. C. Bailey 等人仿效土壤临界状态理论,在土壤真三轴仪上对非饱和土壤的应力—应变关系进行了一系列的研究。设想非饱和土的含水量不变时,在以平均正应力 σ_m 、最大剪应力 τ_{max} 、视容重 BWV (容重的倒数) 为三坐标轴的三维空间中也存在类似于 Roscoe 面和 Hvorslev 面的两个屈服面和一条类似于临界状态线的塑流线。试验证明了压实面的存在,并给出了有关的方程:

$$BW C = B \lg(\sqrt{\sigma_m^2 + \tau_{max}^2}) + D\left(\frac{\tau_{max}}{\sigma_m}\right) + E$$

其中 B 、 D 和 E 是土壤参数。

近年来,由于有限元法应用于土工方面的进展,使地面机器系统的研究工作者受到鼓舞。J. V. Perumpral、R. N. Young 等曾经应用有限元法来研究轮胎与土壤相互作用过程中土壤内部的应力场问题。由于他们沿用土工方面的应力—应变模型,所得出的结果还不能满足车辆地面系统方面的要求。因此,今后还需要根据农业土壤的特点进行大量的试验找出其应力—应变模型。同时,考虑到应力路径和加载速度的影响,以期更接近于车辆地面系统的工况。

拖拉机和农业机械的行走部分与土壤相互作用时,由于行走机构的类型,轮胎的结构、气压,接地面积的形状,滑转率以及土壤的性质和状态等的影响,土壤内部的应力和接触界面上的应力的分布都不是均匀的。最大应力一般都大大超过平均应力。因此在研究农业土壤的压实问题时,不仅需要知道土壤的应力—应变特性,还需要知道行走部分和工作部件下土壤内部和接触面上的应力分布规律。W. Söhne 首先应用布斯涅克公式计算出在轮胎载荷下土壤内部应力的分布情况,并绘制在不同的土壤条件、轮胎气压和轮胎载荷下,土壤中的应力分布图(应力球根)。并得出初步的结论认为:土壤越湿,轮胎气压越高,总重量越大时,压实所影响的深度越深。后一个推断至今对研究大型拖拉机和农业机械对土壤的压实问

题仍有参考价值。

Vanden Berg和 W.R.Gill 在光面轮胎的胎体上埋入压力传感元件, A. M. Кнонов 等人在驱动轮的胎面和轮刺上安放压力盒来测定轮胎工作时接触界面上应力的实际分布情况。

以上所述的都是以土力学为基础的第一类方法, 下面介绍第二类方法。

这种方法是在多年来通过田间和室内试验测取的数据的基础上应用正交设计、方差分析、回归设计等数理统计方法得出容重(或产量)与各种使用参数、结构参数之间的关系, 并以此预测压实的后果。

G. S. V. Raghavan 等人经过多年的室内、外试验, 提出了关于土壤容重 γ 与平均接地压力 p 、土壤湿度 M 、滑转率 s 和压实次数 n 等之间的一系列统计回归方程。现取其中的一类方程举例如下:

$$\gamma = 1.31 + 0.0075(Y) - 0.0005(X) - 0.00009(s) + 0.039 \ln(np) - 0.128 \ln M.$$

式中 Y 为取样的深度, X 为取样离轮胎中心线的距离。

农业土壤压实问题近年来在苏联受到很大的重视, 各有关的研究单位进行了大量田间试验和室内试验。M. И. Ляско等人根据大量的数据提出有关作物产量 Y_i 与土壤参数、行走机构结构参数之间的统计回归方程:

$$Y_i = 100 - A(U_i - [U])\%$$

式中: $U = \omega b q_{max}(1 + \chi \ln N)$

U ——表征行走机构压实土壤的程度, 而 U_i 是行走机构 i 次压实的程度;

$[U] = 7.5$ 牛顿/米, 是 U 的上限值;

ω ——与行走机构接地面有关的系数;

b ——行走机构的宽度;

q_{max} ——土壤的最大压应力;

χ ——重复加载时与土壤残余变形有关的系数;

$\ln N$ ——重复压实次数的自然对数;

A ——与作物种类、土壤性质、气候条件等有关的系数。

三、国内“农业土壤压实”问题的研究概况

关于拖拉机及农业机器行走部分和耕耘对农业土壤的压实与破坏的问题, 在六十年代已引起我国有关方面的重视。黑龙江省的大部分国营农场, 小麦收获时正值雨季, 土壤含水量很高甚至达到饱和。因此拖拉机和联合收获机的行走部分严重地压实土壤, 留下很深的轮辙, 影响了秋耕和春播的质量。为此, 农学家和机务工作者进行了大量的调查和研究工作。近年来, 东北国营农场已逐步采用少耕(或免耕)法以便减少机械作业的次数, 减轻土壤压实。南方水田机耕作业造成泥脚加深、犁底层受破坏和土壤板结等问题也已受到重视。洛阳拖拉机研究所、中国农业机械化科学研究院等单位都曾进行水田土壤力学特性和行走机构与

土壤相互作用方面的研究。

最近几年,北京农业机械学院拖拉机教研室和农牧教研室对农业土壤压实问题进行了调查和研究。1980年麦收期间在北京郊区某农场的留茬地上用经过改装的SY-1型水田土壤承压仪测定从35马力的125马力的5种型号的拖拉机在田间一次通过和多次通过时的圆锥指数,同时用常规方法测定了土壤的容重。1980年秋播期间,在北京郊区七厘渠大队测定铁牛-55型拖拉机播种时轮辙处的圆锥指数、土壤容重和出苗率。同时期在本院实验地分层埋设压力盒测定5种型号的拖拉机一次通过和多次通过时土壤内部的应力状态。初步得出土壤容重、圆锥指数、土壤应力与通过次数、拖拉机总重量之间的关系。从试验结果看出,用圆锥指数、土壤容重或应力表征的土壤压实程度随压实次数的增加而增大,但达到某次数后趋近于某常值。另外还可以看出,铁牛-55型拖拉机由于结构重量大、轮胎断面窄,其压实土壤的程度相当于大型拖拉机,留下较深的轮辙影响了播种质量。根据农业土壤压实研究工作的需要,本院拖拉机教研室在1980年提出了一种测定土壤应变场的新方法——精密喷印网格法,它可以测出轮胎作用下土壤内部任一纵剖面 and 横剖面上的应变场。为了测定轮胎与土壤接触界面上的应力分布状态,在1981年研制成功了埋设在轮胎和履带表面上的三向应力盒。最近又研制成功用于测定土壤内部应力的三向应力盒。

本院拖拉机教研室应用精密网格法和三轴试验研究土壤在圆盘和轮胎作用下的压实与塑流的情况,在此基础上提出了在受压实时土壤内出现土核区、塑流区和第三区的见解。此外,还利用精密网格法研究驱动轮滑转压实的问题,成功地把滑转沉陷从总的沉陷中分离出来。并指出滑转压实是土壤受剪切载荷时的剪缩特性所造成的。但滑转压实主要发生在 $z/a < 1.5$ 的表土层(z ——驱动轮沉陷量, a ——驱动轮接地面长度的一半)。

近年来还探索应用有限元法来计算驱动轮作用下土壤内部的应力场,拖拉机教研室与201所合作研究关于应用经我们修正的邓肯模型编制子程序接入大型非线性有限元程序(NFAP)。计算的结果与土槽内实测的结果比较接近。最近又和机械工业部计算中心合作,将新研究得出的BIAM-YYW模型编制子程序接入大型的非线性有限元程序(ADINA),计算行走部分作用下的应力场。

考虑到我国将引进和生产大型的拖拉机,我们研究了并列双轮的使用效果和拖拉机总重量对压实的影响问题。从试验的结果看出,并列双轮的轮辙浅,有利于提高作业的质量,但由于总重量是影响压实深度的主要因素,因此并列双轮不能减轻深层土壤的压实。

四、对今后“农业土壤压实”问题

研究工作的几点看法

由于我国已开始引进包括大型拖拉机在内的约翰迪尔40系列拖拉机。预期一些大型的拖拉机和农机具将在东北、华北、西北等地区应用。如何减轻大型机具对土壤的压实和消除土壤压实所造成的不良后果是亟待研究的问题。

我国农村体制的变化,近期大量投入使用的是中小型拖拉机和农机具。一般认为中小型拖拉机不存在压实问题或者至少不严重,但应该看到农业土壤的湿度超过某种数值后,中小型拖拉机所造成的压实也是不容忽视的。中小型拖拉机的重量轻,压实的深度相对地比大型

拖拉机浅，但由于这些拖拉机的耕作层也相对比较浅，逐年积累的压实后果是否能消除也是值得研究的问题。

下面提出有关“农业土壤压实”问题研究工作的几点看法，以供参考。

1. 由农牧渔业部农业机械化局和机械工业部农机工业局委托某单位出面组织拖拉机和农机具的研究、设计、制造、使用部门和农业、土壤方面的研究部门协同调查并研究农业土壤的压实问题。

2. 为有利于调查工作的开展和结果的可比性，建议组织有关人员讨论并制定出评价土壤压实的指标和测定的规范。委托有关单位研制出适合于大面积普查和测试的仪器。

3. 深入探索农业土壤的压实机理，研究土壤受压实时的力学特性、物理机械性质、生物理化性质的变化规律及其对作物的生长和产量、行走部分和工作部件的工作性能的影响。

4. 继续研究和验证现有的古典土力学、土壤临界状态理论、非线性有限元法、统计回归分析等方法在建立农业土壤压实预测方程方面的可行性。并在此基础上探索新的理论和预测方法。

5. 探索减轻土壤压实的方法和途径。

研究农业土壤压实的目的是寻求减轻土壤压实的途径和方法。目前国外从农业技术、拖拉机和农业机器的结构改进和合理使用等方面进行研究，设法减轻农业土壤的压实。农业方面采用免耕法或少耕法减少压实土壤的遍数。机器的使用部门采用“局部压实”或“永久性机行路”等措施减少压实的面积。结构设计方面，除了采用并列双轮、网格轮、低压宽断面轮胎等措施外，目前正研制宽架式拖拉机和多轴驱动的拖拉机。以上国外所采用的各种措施和途径可供我们借鉴。但最终还要根据我国的具体情况，创造出适合于我国不同地区的自然条件、农业技术要求、使用管理水平的方法和途径。

四、农业土壤压实问题的“实践”

农业土壤压实问题的“实践”

农业土壤压实问题的“实践”是指在实际农业生产中，由于各种因素造成的土壤压实现象及其对农业生产的影响。

农业土壤压实问题的“实践”是指在实际农业生产中，由于各种因素造成的土壤压实现象及其对农业生产的影响。

农业土壤压实问题的“实践”是指在实际农业生产中，由于各种因素造成的土壤压实现象及其对农业生产的影响。

土壤-机器系统研究中的 土壤应变测量法

余群 喻谷源 贺祖年 高大水 焉云和

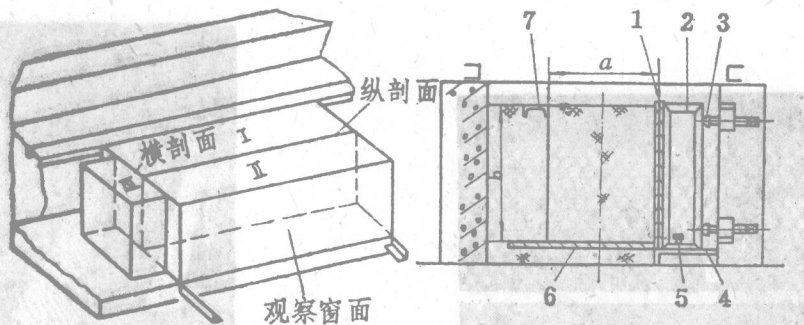
在土壤-机器系统研究工作中,经常需要了解土壤受外载后的变形量及变形规律。土壤的应变测量对于土壤压实和行走机构-土壤相互作用等研究领域更是一项十分重要的实验手段。国内外许多学者曾提出过不少的测量方法,有预先在土中埋设编码的小木块,受载荷以后测量小木块的位置;亦有埋设铅粒,在受载前后用放射线照像记录铅粒位置的变化;或采用侧面的玻璃窗,观察土体某一侧面受载荷前后的变形等等。但是迄今未取得令人满意的结果。上述方法的缺陷是埋设标志的位置不精确,其次埋设标志的位移只能反映土壤中各个断续点的位移,不能得到土壤颗粒的连续位移情况。玻璃观察窗虽可克服上述缺点,但是局限于反映土体的某一侧面的位移,不能获得土体纵深剖面内变形的情况。

在多年的实验研究的基础上,我们于1981年提出了一种新的土壤应变测量方法,即“精确网格喷印法”,简称精喷网格法。经过逐步完善和实验,目前已在滑转-沉陷,滑转-压实,并列双轮性能和行走机构重复压实土壤等研究工作中应用,取得较好的效果。下面结合这些研究工作的实际测试,介绍该方法的原理和效果。

1. 精喷网格法在滑转沉陷研究中的应用

为了深入研究滑转沉陷和滑转压实的机理,一方面需要了解滑转沉陷和滑转压实的动态过程,另一方面需要从沉陷量中分辨出压实沉陷量和其它动态沉陷量,我们应用精喷网格法较为成功地解决了上述的问题。

精喷网格法的基本原理是应用类似于铸造时制作型砂箱的技巧,根据研究的要求在土槽内制作土体I、II和III(图1)。土体I和II之间的纵面应对应于轮胎的纵向对称平面。在



1, 观察窗(或模板); 2, 铁框架; 3, 顶紧螺钉; 4, 导轨; 5, 调节螺钉; 6, 铁板; 7, 槽钢

图1 试验装置示意图

制作土体时土壤各层的厚度、容重和湿度均可按试验的要求制作。制作的工艺特点和顺序是：首先制作土体Ⅰ并在其纵剖面上喷上网格；其次制作土体Ⅱ，取下土体Ⅰ、Ⅱ之间的纵向隔板，让土体Ⅰ、Ⅱ合拢，并在贴近土槽观察窗一侧的土体纵剖面上喷上网格；最后制作土体Ⅲ，取下土体Ⅲ与土体Ⅰ、Ⅱ之间的横隔板，取出土体Ⅲ喷上网格再让其和土体Ⅰ、Ⅱ合拢。为了保证土体Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ能紧密合缝，对纵、横隔板两面的平行度和表面平度都提出较高的要求。图2是土体制作完毕后的全貌。

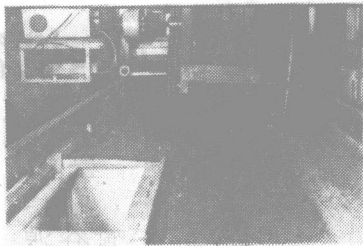


图 2

滑转沉陷和滑转压实试验是在控制滑转率和控制牵引阻力的两种主要工况下进行的。它们又可分为下述的三种情况：

- (1) 受控的驱动轮滑转率为某定值（例如15%、25%和40%等）；
- (2) 受控的驱动轮滑转率为变量，从某较小的数值连续增大到某较大的数值；
- (3) 按研究的需要变化驱动轮的牵引阻力。

在上述工况下，每当驱动轮驶过观察窗时用录像机或高速摄影机拍摄下驱动轮滑转沉陷和滑转压实的动态过程。图3是驱动轮通过观察窗的某瞬间拍下的照片。图4、图5是内层和外层纵剖面上的网格变形图。图6是横剖面和内层纵剖面网格变形立体图。可用描图纸描出网格变形图，由于喷网格时留有网格板的定位标记，故可用网格模板作为原始坐标计算出土壤受载后的变形量。根据所得出的结果可找出变形的规律并可分辨出压实沉陷和滑转沉陷

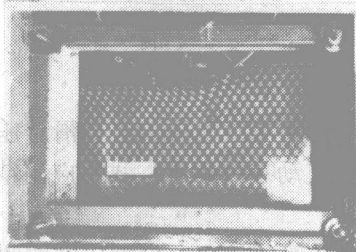


图 3

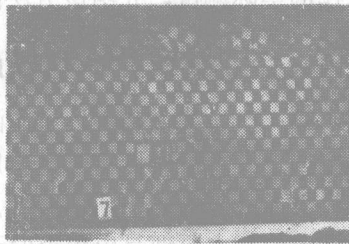


图 4

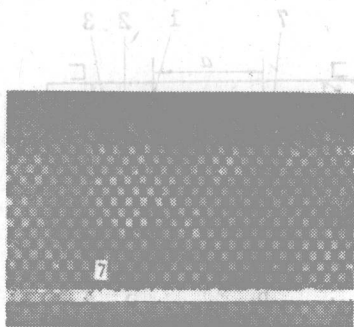


图 5

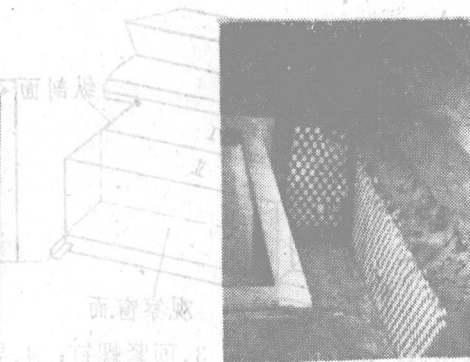


图 6

的数值。

图7是用精喷网格法对刚性轮和轮胎的滑转沉陷测量结果。这种测定方法能在不同的纵深剖面上，定量给出各个因素所形成的沉陷量，为滑转沉陷机理的研究提供了分析依据。

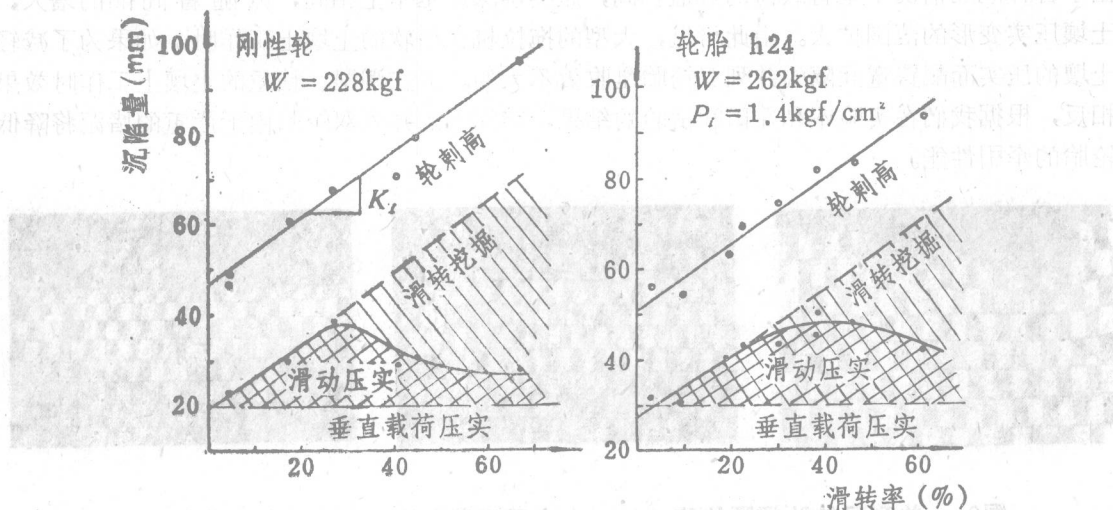


图7 用精喷网格法测定的滑转沉陷量

2. 精喷网格法在并列双轮胎性能研究方面的应用

在并列双轮胎性能的研究中，应用精喷网格法来研究并列双轮间隔的配置对并列双轮胎性能的影响也获得良好的效果。这时利用类似于前述的方法制作所需要的土体并在相应的横剖面 and 纵剖面上喷印网格。根据研究的要求其中的一个纵剖面取在两轮间隔的中点而另一个纵剖面取在某一轮胎的纵向对称平面处。

图8、图9和图10是并列双轮胎在两轮间隔数值不同时（间隔比值相应为 $\frac{s}{b} = 0, 0.4, 1.2$ ）的网格变形图。图中左图表示横剖面的网格变形图，中图表示对应于间隔中点的纵剖面网格变形图，右图表示对应于轮胎纵向对称平面处的纵剖面网格变形图。从图上可看出，间隔愈小时，间隔处的土壤的切向变形愈大，说明这种条件下这部分土壤在驱动轮胎驱

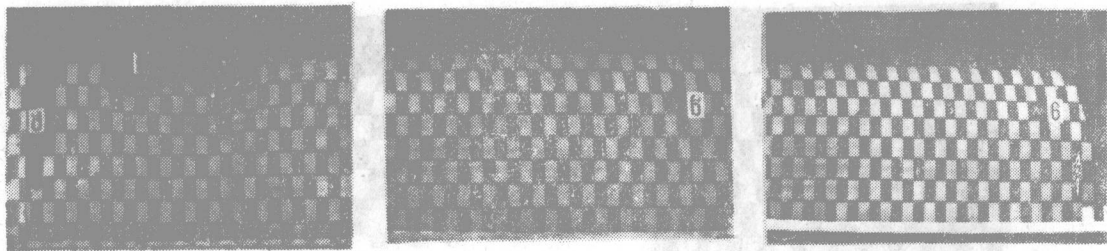


图8 并列双轮胎的间隔比值 $\frac{s}{b} = 0$

(s ——间隔值； b ——轮胎宽度)；垂直载荷 $W = 444$ 公斤力；滑转率 $i = 25\%$

动力的形成中起了较大的作用，随着间隔的增大，这部分土壤的切向变形减小，说明这部分土壤在形成驱动轮胎驱动力方面未起太大的作用。此外，从横剖面的网格变形图上可看出，由于各种间隔情况下垂直载荷的数值相同，压实层深度基本上相同，但随着间隔的增大，土壤压实变形的范围扩大。由此可见，大型的拖拉机在松软的土壤上工作时，如果为了减轻土壤的压实而配置宽间隔的并列双轮胎是收效不大的。但在潮湿、粘重的土壤上工作时效果相反，根据我们在实验室和田间试验的结果，窄间隔的并列双轮胎由于严重的堵泥将降低轮胎的牵引性能。

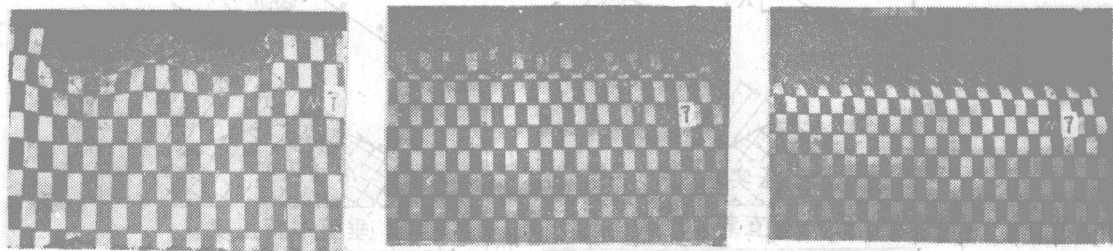


图9 并列双轮胎间隔比值 $\frac{s}{b} = 0.4$ ；垂直载荷 $W = 444$ 公斤力；滑转率 $i = 25\%$

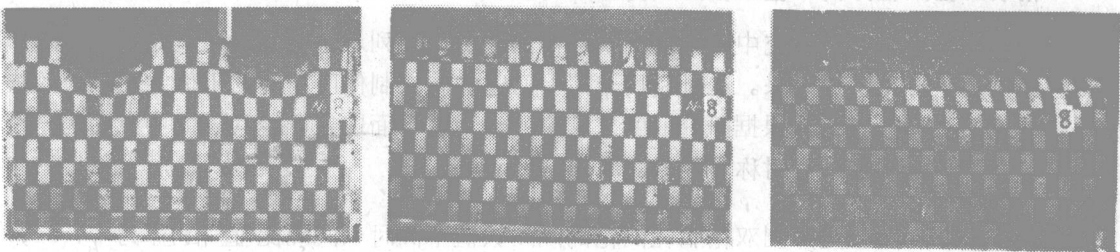


图10 并列轮胎的间隔比值 $\frac{s}{b} = 1.2$ ；垂直载荷 $W = 444$ 公斤力；滑转率 $i = 25\%$

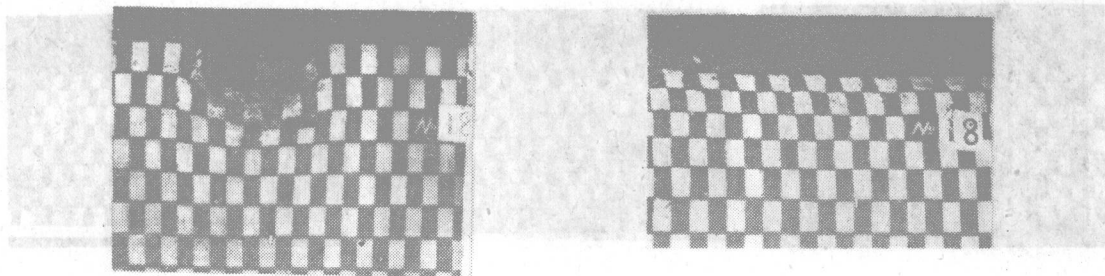


图11 单轮垂直载荷 $W = 356$ 公斤力；滑转率 $i = 25\%$

应用精喷网格法还可以在单轮（图11）和并列双轮胎对土壤的压实方面进行对比。

3. 精喷网格法在研究驱动轮重复压实方面的应用

轮胎重复压实土壤的后果以及驱动轮重复通过时牵引性能问题是大家所关心的。我们近年来也在这方面进行了研究,为了深入了解驱动轮重复通过时土壤的压实变形和切向变形采用了精喷网格法。这时我们用一个特别的、由两半组成的型箱来制作土体,并在土体的横剖面 and 纵剖面上喷印网格。由于有图12上所表示的可卸的半边型箱,每次驱动轮驶过后可取出可卸的型箱和土体来描绘网格变形图形,然后再合箱进行下一次试验。试验的次数按研究的需要来决定。这样就可以计算出驱动轮每通过一次的土壤压实变形和切向变形。

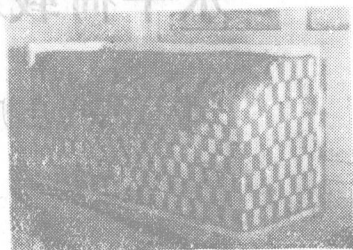


图 12

结 论

经过几年的研究和应用证明精喷网格法基本上能满足行走机构-土壤相互作用研究中对土壤应变测量所提出的要求。从以上的内容可看出精喷网格法的优点是:

1. 可以根据试验研究的需要得到任何剖面上的变形图形;
2. 厚度为0.1毫米的喷印粉末层对土壤的强度和其它力学特性无任何不良的影响;
3. 网格作为土体的一部分与周围的土壤一起变形;
4. 网格的尺寸和形状可以制作得很精确,保证了变形量的测量精度;
5. 可以用原来网格板作为原始坐标计算土壤受载后的变形量;
6. 适用于土壤湿度在23%以下的试验条件;
7. 工艺简单。

由于上述的优点我们相信精喷网格法今后将推广到其它有关的研究领域。

水平荷载对土壤的压实作用

“拖拉机行走机构与土壤相互作用”课题组

一、前言

在田间作业的拖拉机，当负荷加大时滑转率相应增大，地面上的轮辙深度几乎与滑转率成正比加深。除了附着重的作用使土壤承受垂直载荷产生沉陷以外，土壤受剪产生水平位移的同时也产生了滑转沉陷和附加的压实——滑转压实^[1]。实践表明，行走机构的过大的滑转，对表土结构的破坏是十分显著的。为搞清滑转沉陷和滑转压实的原因，必须研究土壤在水平荷载作用下的响应。

本文从松软土壤的剪缩特性和驱动轮下应力分布两个方面研究了水平荷载对土壤的压实作用，并用“网络坐标法”测量了垂直荷载及附加水平荷载造成的压实沿土层深度的分布规律。

非饱和松软土壤的剪缩特性

土壤是由水、气、土粒三相组成，它的力学性质和其他材料的不同之点是强度与应力状态有关，在变形过程中产生较大的体积变化。因此对滑动沉陷量的研究必须从土的本构关系着眼，进而推论驱动轮下的土体才可能说清楚。

由于常规三轴仪对非饱和土的体积变化量测尚不完善，测得的试样体积变化必须进行校正，即使这样其平行试验之间的差别仍使试样体积变化量测误差达10%以上^[2]，因此采用图1所示的多环单剪仪（水利水电科学院研制）进行试验研究。

本仪器由10个重叠起来的钢环构成剪切盒，通过滑动底座及摇杆施加水平剪切力，其余部分和直剪仪相同，十个重叠的钢环防止了试样受压侧向膨胀，使之处于K₀固结状态。受剪力作用时这些钢环可以互相错动，剪力均匀分布于试样。在剪切过程中根据垂直方向百分表读数由下式就可准确测得剪切过程中土样的孔隙比变化：

$$e = e_0 - (1 + e_0) \frac{S}{H}$$

式中：e——孔隙比；

e_0 ——初始孔隙比；

S——加载过程总沉陷量；

H——试样初始高度。