

测量根系对土壤机械压力的试验装置设计

胡林¹, 王飞^{1,2}, 李晓明¹, 穆兴民^{1,2}, 宋自影¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 根系对土壤机械压力是综合反映土壤-根系复合体相互作用的力学指标。该研究研制出了一种可利用气体或液体介质进行直接测量根系对土壤机械压力的试验装置。利用气体介质测量装置进行了模拟根系的穿插试验取得了较好的试验结果; 利用液体测压试验装置进行了模拟根系穿插试验和植物生长期根系压力测定的初步试验, 结果表明: 装置满足压力测量试验设计的需要, 具有较好的适用性和精度, 可以用本试验装置直接进行根系对土壤机械压力的测量。

关键词: 根系; 机械压力; 试验装置; 设计

中图分类号: Q947. 6; S152. 9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)06-0138-04

An Apparatus for Measurement of Root System Pressure on Soil

HU Lin¹, WANG Fei^{1,2}, LI Xiao-ming¹, MU Xing-min^{1,2}, SONG Zi-ying¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The pressure of root system on soil is a synthetically mechanical index of reflecting the root-soil composite system. An introduction to a new apparatus, which can measure the pressure of root system on soil, is designed and manufactured. The experimental data measured using the new apparatus with the air-medium and liquid-medium are obtained. The new apparatus with the liquid-medium can also meet the demands of an experiment for measuring the pressure of root system on soil during the plant growing period. It is shown by the experimental data measured using this new apparatus is suitable to measure the pressure of root system on soil with high accuracy.

Key words: root; system pressure; experimental apparatus; design

植物根系生长发育时会遇到土壤的阻碍, 根系会通过自身的穿插伸展不断的克服土壤的阻碍, 根系在土壤中的生长过程可以理解成一种穿插过程。植物根系在土壤中穿插生长, 有纵向生长和横向生长, 生长过程中, 根系不断穿透土层, 吸收养分、水分, 参与体内物质的合成与转化, 与土壤团粒、水分等形成活性有机体, 与土壤团粒、水分、微生物、矿质营养元素的相互吸引产生吸附力, 固定植株。在这种穿插过程中, 根系主要依靠根毛区的膨胀细胞来不断的推动其生长发育^[1-3]。在根系生长时, 根尖向四周的土体产生的轴向作用力在根尖后面便呈圆柱体扩大, 这种产生于根系表面的使土壤会产生形变的力是一种压力,

这种压力就是根系对土壤机械压力。

当根系穿过土壤并在一定深度分布时, 根系与土壤及其有机物质紧密地结合形成了一个特殊的复合材料, 即土壤-根系复合体^[4-6]。根系对土壤机械压力是综合反应土壤-根系复合体相互作用的力学指标, 对于农业土壤, 由于其三相特性和作物生长环境的变化, 给土壤-根系复合体力学特性的精确定量描述带来极大困难^[1, 5-6]。根系产生的应力-应变呈非线性的关系。郭维俊等以小麦为研究对象, 通过理论分析认为土壤中任一点所受到的垂直应力的数值与土壤容重、土壤深度成正比^[8-9]。无论在自然状态, 还是在外力作用下, 土壤-根系复合体的本构关系不仅

收稿日期: 2010-08-10

资助项目: 国家科技支撑计划项目“黄土高原水土流失综合治理工程关键支撑技术研究”(2006BAD09B00); 欧盟框架计划项目(FP6, DESIRE, 037046); 西北农林科技大学留学归国人员科研专项(111020723)

作者简介: 胡林(1986-), 男, 陕西西乡人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持工程。E-mail: hulin@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 王飞(1971-), 男, 陕西户县人, 博士, 副研究员, 从事水土保持环境效应评价研究。E-mail: wafe@ms.iswc.ac.cn

具有生命特征, 还具有鲜明的不连续、不稳定、多相、非均匀、各向异性等特点^[7-9]。

目前根系对土壤机械压力的研究较为薄弱, 研究方法和手段较为欠缺, 研究结论多为通过间接方法或理论分析得到土壤中任一点受到的压力大小和分布, 而对于直接测量根系对土壤的机械压力的试验结果还未见报导。由于对根系的研究手段的限制和土壤环境的复杂性, 加之土壤对植物根系的限制, 测量根系对土壤的机械压力最理想的办法是记录与根伸长区的表皮和根冠的表层有接触的土壤的每一点的压力, 而目前还没有方法可以做到这一点^[1], 因此, 我们采用的方法是通过适当灵敏度的探测器去测量土壤在受到根系作用发生形变时产生的综合压力。在本研究中, 通过多次尝试和试验, 研制出了一种可利用气体和液体介质进行直接测量根系对土壤机械压力的试验装置。利用气体介质测量装置进行了模拟根系的穿插试验取得了较好的试验结果; 利用液体测压试验装置进行了模拟根系穿插试验和植物生长期根系压力测定的初步试验, 结果表明装置满足压力测量试验设计的需要, 具有较好的适用性和精度。

1 试验装置

1.1 技术难点

压力测量装置设计的基本思路为: 在土壤中埋设与土壤结合紧密且受到微小压力会产生形变的探测器, 同时, 确定可与探测器相连接并可用于显示压力大小的测压装置。本试验装置应考虑的技术难点和应该满足的基本条件主要有以下两个方面:

- (1) 可埋设在土壤中并在植物生长期可以探测到土壤因受到根系机械压力而产生微小形变的探测器。
- (2) 对根系在土壤生长过程中产生的机械压力大小的范围进行初步确定, 以便选择适用的压力测量装置。

1.2 装置介绍

试验装置由试验装土管和压力测量系统两部分组成。试验装土管(见图 1)利用聚乙烯管材制作而成, 装土管直径 16 cm, 底端封闭, 预留 3 个 8 mm 小孔用于植物生长的排水和通气需要。形变探测装置选用医用双连球的气囊, 该气囊为天然橡胶制作而成, 其拉伸强度 ≥ 14 MPa、扯断伸长率 $\geq 280\%$, 气囊经阻漏处理后对内充满气体或液体呈球形, 气囊大小根据试验需要可变化, 气囊上部导管用于压力测量。土管高度和探测装置安装个数可根据试验所需测定土层情况确定。

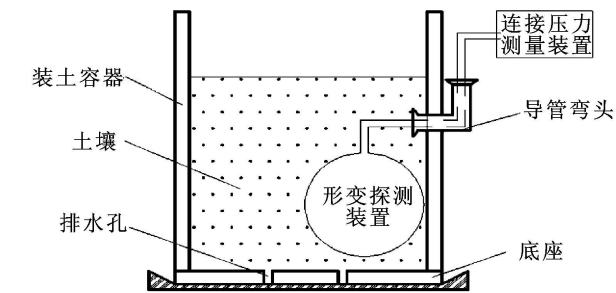


图 1 试验装置示意图(装土管部分)

试验装置的工作原理为: 植物根系在装土管内的装填土壤中生长时, 对土壤进行穿插, 致使土壤产生扰动而发生形变并挤压气囊, 气囊内测压介质受挤压后, 在压力测量系统中可以反映出土层中探测气囊所在土层受到的根系机械压力大小变化。压力测量系统根据形变探测装置内的探测介质分为气体介质压力测量系统和液体介质压力测量系统。

1.2.1 气体介质压力测量系统装置 气体介质压力测量系统由双连球的气囊与压力表通过导气管连接组成(如图 2)。在孔径 2 cm 的侧壁孔上安装导管弯头(如图 1), 导气管穿过图示导管弯头与测量系统连通。侧壁孔上的导管弯头固定并保证气囊导气管自由抽动且不受挤压。气体介质压力测量系统采用的膜盒压力表最小刻度为 0.5 kPa, 最大量程为 30 kPa。

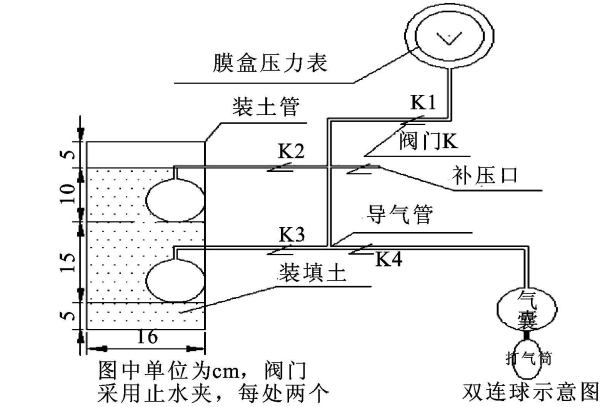


图 2 气体介质试验装置示意图

1.2.2 液体介质压力测量系统装置 液体介质压力测量系统由双连球的气囊的导管与测压管通过乳胶管连接组成(如图 3)。液体介质压力测量系统利用测压管进行压力测量, 为了防止液体在测压管中出现毛细现象影响测量准确度, 测压管选用直径为 10 mm 的玻璃管根据等压面原理制作而成^[10], 通过测压管内的液面高度变化显示根系对土壤的机械压力变化。测压管测压时根据液体的种类和待测压力大小的需要设置测压管长度, 其测压的最小刻度为 1 mm 液体柱。以纯水为例, 1 mm 水柱高折算成压力为 0.1 kPa, 其精度较气体介质压力测量系统高。

1.3 操作步骤

结合设计的 2 种压力测量系统, 本试验装置的操作步骤亦有所差异, 具体操作步骤分述如下:

1.3.1 气体介质测量系统装置操作步骤 (1) 装土管制备。利用直径为 16 cm 的聚乙烯管材按图 1 所示进行安装和固定, 底座垫纱网和滤纸防止土壤渗漏。

(2) 探测气囊空气填充。按图 2 所示, 连接好气囊和压力表及双连球打气装置, 以底部的气囊充气为例, 关闭所有阀门, 打开 K1、K3、K4, 利用补压口的打气装置对底部的气囊进行充气, 并注意观察压力表的示数变化, 利用补压口阀门的开关控制气囊与压力表示数变化, 当指针首次到达 5 kPa 或者 10 kPa (根据试验设计先行确定) 时, 缓慢挤压 1~2 次打气球, 使指针缓慢变化, 当指针恰好停留在 5 kPa 或者 10 kPa 时停止打气, 关闭补压阀门 K4, 去掉补压口的打气装置。另外, 打气过程中要注意保护压力表。

(3) 装置填土及组装。将制备好的土壤按照设计容重进行分层装填, 计算装土量时应当排除气囊的体积 (可利用排水法计算)。填土按照分层装填的方法进行, 自下而上, 依次填装, 当填土到达气囊位置时, 按照步骤 (2) 中的方法将气囊进行气体填充。填充完毕后继续装填土壤。根据试验设计的测量土层依次完成土壤和气囊安装。

(4) 装土时的装置连接。为了保证装置安全可用, 在连接装置时首先将所有橡胶管与压力表、气囊按图示连接, 检查装置气密性, 保证不漏气后开始装土。安装时按照步骤 (2) (3) 中的方法对气囊处理完毕后, 将其固定好, 之后开始装土, 装土时应将气囊对应的阀门 (底部为例为 K3) 关闭, 装填时应当缓慢压土。装土完成后, 打开阀门 K4, K1, 记录压力表读数。

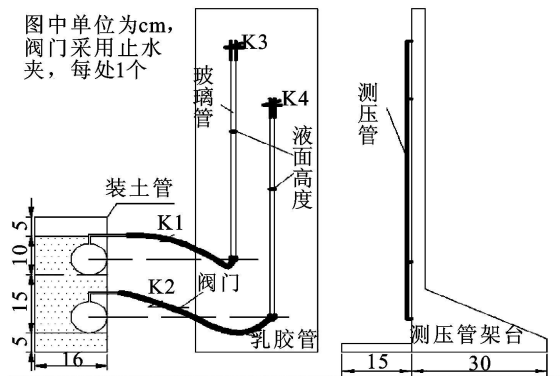


图 3 液体介质压力测量系统装置图

(5) 压力值测量与记录。利用压力表进行压力测量, 以图 2 所示底层压力测量为例, 测量时通过打开阀门 K1、K4 确保仅底层气囊与压力表连通, 其他层

的气囊与压力表连通的阀门处于关闭状态, 记录压力表值即为底层压力。底层测量完成后先关闭阀门 K1, 后关闭 K4, 待压力表指针回零后打开其他层的阀门进行测量。

1.3.2 液体介质测量系统装置操作步骤

(1) 装土管制备。利用直径为 16 cm 的聚乙烯管材按图 1 所示进行安装和固定, 底座垫纱网和滤纸防止土壤渗漏。

(2) 探测气囊纯水填充。为精确控制探测气囊的填充的装水量, 利用马氏瓶对气囊进行灌水, 将马氏瓶底部与气囊导管连接, 顶端用打气装置对马氏瓶进行加压使水进入气囊内, 并记录灌水量, 为保护气囊, 灌水量介于 400~550 ml 之间为宜。灌水完成后, 利用止水夹将导管封闭。

(3) 装置填土及安装。将制备好的土壤按照设计容重分层进行装填, 计算装土量时应当排除气囊的体积 (可利用排水法计算)。填土按照分层装填的方法自下而上, 依次填土, 当填土到达气囊位置时, 将充水后的探测气囊固定在土壤中后继续装填土壤。根据试验设计的测量土层依次完成土壤和气囊安装。

(4) 测压管安装。测压管竖直固定在测压管架上, 测压管底端位置与灌水气囊的球心位置在同一高度。气囊导管与测压管之间用乳胶管连接, 并用预留阀门用于后续测量。为了减少在植物生长期测压管内液体的蒸发, 测压管顶部设置阀门。仅在测量时保证测压管与大气相通, 其他时间均将顶部阀门关闭。

(5) 压力值测量与记录。每次测量压力时, 以图 3 所示底层为例, 打开 K2 阀门后, 气囊内水分受压会进入测压管中, 再打开顶部 K4 阀门, 使之与大气相通, 从而测量气囊处所受到的压力, 待液面稳定后读取凹液面高度, 将其换算便得到压力值。测压管侧贴带刻度的网格坐标纸用于记录在植物生长过程中每次测量的压力变化情况。

2 装置用途与检验

2.1 装置优缺点

本研究中的两种装置设计相比, 气体介质压力测量装置的优点在于操作简便, 测量量程易更换, 缺点在于压力表精度为 0.5 kPa, 精度较差, 且气体介质易受温度变化的干扰使压力测量的误差较大, 也不利于测量植物根系生长发育过程中的根系对土壤的机械压力变化情况, 因此气体介质压力测量装置只能用于短时间内根系对土壤的压力测量。液体介质压力测量装置的优点在于精度较好, 以纯水为测量介质其精度为 0.1 kPa, 而且根据测量介质的不同其测量精

度仍可变化,可以用于植物生长期内的长期压力观测,缺点在于操作和制备较为复杂,且测压管的高度需要在试验前确定大致变化范围。

2.2 装置用途与检验

2.2.1 气体介质测压装置用途及检验 由于根系对土壤机械压力的复杂性和相关研究的薄弱性,目前对于根系对土壤机械压力的量化研究未见有文献报道,在设计测量系统时为确定压力测量系统的测量量程,需要对根系在土壤生长过程中产生的机械压力大小的范围进行初步确定。因此,结合两种介质测量装置的优缺点,我们选用了气体介质测压装置进行了根系对土壤机械压力的模拟试验,试验采用模拟根系利用人工模拟根系生长的方法对土壤进行机械穿插,从而分析在此过程中模拟根系对土壤的机械压力大小和分布,取得了良好的研究结果。同时,利用模拟试验方法模拟了极端情况下根系对土壤的机械压力,根据模拟试验的研究结果,直径为 25 mm 的模拟根系在土壤中出现的最大机械压力为 7 kPa。该模拟试验也为液体介质测压装置测压管的高度设计提供了一定的依据。

2.2.2 液体介质测压装置用途及检验 结合气体介质测压装置的模拟试验研究结果,在后续研究中,我们对常见植物根系对土壤机械压力进行研究时,利用模拟试验的结果,进行液体介质压力测量装置设计时,选用纯水为测压介质,根据水柱高度与压力值的转化关系,设计测压管高度为 120 cm,在装土后其测压量程满足试验需要,其测量精度达到 1 mm 水柱即 0.1 kPa 也可满足试验观测需要。利用纯水介质测压装置采用模拟试验方法进一步对模拟根系对土壤的机械压力特性进行了研究,取得的结果与气体介质测压装置结果基本一致,特别是对直径较小的模拟根系对土壤的机械压力大小和分布取得了较好的结果。

为了进一步验证测压装置的适用性,我们选用纯水介质测压装置进行了植物根系生长期内的压力观测试验,试验选用常见的乔灌木及农作物根系为试验材料,将装土管置于温室内对植物进行培育,同时,设计无根系土壤对照组用以克服植物生长周期内由于土壤温度和水分变化及施肥等因素使土壤产生形变而使装置出现的系统误差对根系压力测量结果的影响。试验中记录植物生长期内根系对土壤压力的大小和分布以及生长期压力变化情况。初步试验结果表明,纯水介质压力测量系统能够克服土壤温度和水分变化及施肥等影响因素并对根系生长过程中的土壤各层内部的综合压力变化进行响应并通过测压管可以反映其压力值变化;另外,结合对试验过程中无根系

土壤的对照组装置内压力变化的观测也发现,在灌水条件下,水分的入渗、再分布和蒸发过程中,装置测压系统均有变化,表明本装置还可以测量土壤 in 可塑状态下土壤含水量变化所引起的土壤内部压力。

3 结论

(1) 根系对土壤机械压力是综合反应土壤-根系复合体相互作用的力学指标,研制用于直接测量根系对土壤机械压力的试验装置对推动根系力学性质和土壤学的研究具有十分重要的意义。

(2) 本文通过多次尝试和试验,研制出了一种可利用气体和液体介质进行直接测量根系土壤机械压力的试验装置。利用气体介质测量装置进行了模拟根系的穿插试验取得了较好的试验结果;同时,利用液体测压试验装置进行了模拟根系穿插试验和植物根系生长期内的压力测量的初步试验,装置满足试验设计的需要,具有较好的适用性和精度。本装置可以直接进行根系对土壤机械压力的测量,同时也可用于土壤水运移过程中的土壤内部压力的测量。

参考文献:

- [1] Bengough A G, Croser C, Pritchard J. A biophysical analysis of root growth under mechanical stress[J]. Plant and Soil, 1997, 189: 155-164.
- [2] Stolzy L H, Barley K P. Mechanical resistance encountered by roots entering compact soil[J]. Soil Sci., 1968, 105: 297-301.
- [3] Dexter A R. Mechanical of root growth[J]. Plant and soil, 1987, 98: 303-312.
- [4] 李小早. 农业生物力学在农业工程中的应用[J]. 西北农业大学学报, 1994, 22(1): 105-109.
- [5] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 62-65.
- [6] 杨亚川, 莫永京. 土壤-草本植物根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(2): 31-38.
- [7] 宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍, 等. 林木根系与土体相互作用的有限元数值模拟中几个关键问题的探讨[J]. 水土保持研究, 2009, 14(4): 6-13.
- [8] 郭维俊, 黄高宝, 王芬娥, 等. 土壤-植物根系复合体本构关系的理论研究[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(2): 35-38.
- [9] 郭维俊. 小麦生长的力学特性及其动力学规律研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008: 33-36.
- [10] 吕宏兴, 裴国霞. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 22-23.