

土壤-植物根系复合体本构关系的理论研究

郭维俊¹ 黄高宝² 王芬娥¹ 吴建民¹

(1. 甘肃农业大学 工学院, 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学 农学院, 兰州 730070)

摘要 为研究土壤-根系复合体强度问题,运用土壤力学理论和复合材料力学方法分析了土壤-根系复合体的力学特性和力学模型;在弹性、横观各向同性条件下,计算得出了表征土壤-根系复合体应力-应变关系的本构方程。研究表明:土壤-根系复合体的强度,不仅与土壤和根系的材料特性、形态结构、含水率以及根系含量有关,而且与土粒和土粒之间、土粒和根系之间的黏聚力、内摩擦力密切相关。

关键词 土壤-根系复合体;应力-应变;本构方程

中图分类号 S 12; Q 947.6

文章编号 1007-4333(2006)02-0035-04

文献标识码 A

Study on constitutive relation of soil-root composite

Guo Weijun¹, Huang Gaobao², Wang Fene¹, Wu Jianmin¹

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract To investigate the strength of the soil-root composite in water and soil conservation, the constitutive model of a soil-root composite and its characteristic parameters, based on the fundamental theory of soil mechanics and the basic methods of mechanics of composite materials, was established in this paper. The constitutive equations of the soil-root composite, which express the stress-strain relationship, were derived under the hypothesis of isotropy. The results indicate that the strength of the soil-root composite is not only related to the physical properties, structure, water keeping capacity of soil and plant roots, but also to the friction force and adhesions between soil granules and roots, as well as among soil granules themselves.

Key words soil-root composite; stress-strain; constitutive equation

近 50 年来,国内外学者针对水土保持、土地荒漠化治理过程中遇到的土壤、植物根系强度问题,对木本植物、草本植物、农作物等不同种类植物根系的形态性状、分布规律、固土机理,以及不同类型土壤结构及强度等进行了大量试验研究,其成果^[1-4]已在植被生态恢复、山体滑坡治理、公路铁路边坡的稳定、河岸护堤等工程中得到广泛应用。在植物根系的力学特性方面,已有对香根草、沙打旺等草本植物和杨树、黄刺梅等乔灌木根系的抗拉强度进行拉伸、压缩、弯曲、冲击等研究,并得到了少数植物根系的应力、应变、弹性模量的试验数据和曲线。在土壤抗侵蚀机理方面,也有对黄土高原等不同类型的土壤的凝聚力、内摩擦角、断面倾角,土壤的抗冲性能和

抗蚀性能,以及植物根系在提高土壤抗侵蚀强度的大量研究,并得到一些评价土壤、根系抗侵蚀能力的重要指标和经验公式^[5-9]。但是,在已有的成果中,绝大多数将土壤与根系分离,单独进行试验研究,少有对土壤-根系作为一个整体系统进行分析研究的成果。本研究旨在从理论上探讨土壤-根系复合体的力学特性和本构关系,为土壤-根系复合体应力-应变规律的进一步试验研究提供参考依据。

1 土壤-根系复合体力学特性分析

土壤由固、液、气三相组成,固相颗粒主要为矿物质,包括石块、石砾、砂粒、粉粒和黏粒等,也有无机与有机物结合的颗粒,众多土粒堆聚的多孔的松

收稿日期: 2005-12-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2002AA623191)

作者简介: 郭维俊,副教授,主要从事植物力学研究, E-mail: guowjzj@163.com; 黄高宝,教授,博士生导师,主要从事干旱农业研究。

散体构成了土壤的骨架。水、空气、土居生物都存在于土壤骨架内部的孔隙中,土粒的大小和排列方式对土壤水、肥、气、热状况及植物根系的生长有重要的影响和制约^[10]。

根系在土壤中穿插,有纵向生长,也有横向生长,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。当根系穿过土壤并在一定深度分布时,根系如同复合材料中的纤维一样与土壤紧密地结合,形成一个特殊的复合整体,犹如地下“钢筋混凝土”,即土壤-根系复合体。该复合体的根系通过斜向牵引、垂直锚固等机械作用,增强了土体的黏附力,增加了根际土层的综合强度^[11]。

常规工程材料,如钢筋混凝土、木材、金属等,可在人为控制下构造成一定的标准形状,其力学特征以及工程行为等都可以测度,因而能够纳入严密的工程计算和设计中。对于土壤-根系复合体,由于土壤的三相特性和植物根系在不同生理状态以及不同生长环境下性质的变化,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。因此,土壤-根系复合体,无论在自然状态,还是在外力作用下,其本构关系不仅具有生命特征,而且具有不连续、不稳定、多相、非均匀、各向异性等鲜明特点,其应力不仅与应变有关,而且与流动因素有关,其应力状态远比一般工程材料的情况复杂得多^[12]。

尽管如此,复合材料、土力学、钢筋混凝土的研究理论和研究成果能给我们一些有意义的启示。从宏观角度看金属材料是连续的,而从原子尺度,则大部分存在空隙,是不连续的,即使宏观上,钢筋混凝土是典型的多相、非均匀、各向异性的复合体。对这些材料的最初分析大多数是从弹性理论入手,经实验、修正,也得到了一些有意义的结果,如自然状态下土壤的应力公式 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ 。因此,可以认为大多数材料的连续性、均匀性仅仅是程度上而不是本质上的差别。事实上,由于土壤-根系胶体物质和黏土粒的存在,复合体有时也表现出一些弹性体的特征。实践证明,当作用力很小时,土壤-根系复合体将有微量变形,并且因复合体中的能量储存而达到平衡。当作用力解除时,复合体变形可以完全恢复或在一定程度上恢复^[13]。

综上,可将土壤-根系复合体视为由多相组份构成的具有弹性的复合材料,其中土壤为基体相材料,根系(长纤维)为增强相材料。为便于理论分析,

假设:土壤-根系复合体宏观均质、线弹性、正交各向异性、无初应力;土壤、根系分别为均匀、线弹性、各向同性;土壤与根系在交界面处有相同的应变、不发生滑移;土壤和根系都处于小变形状态;根系在土壤中纵横随机分布。没有上述假设就不可能作统一的理论分析,但也正是由于这些假设,使力学分析和实际情况存在较大差距,其结果尚需实验修正。

2 土壤-根系复合体本构关系的建立

土壤-根系复合体(根际土层)是一种具有弹性的特殊复合材料,在外力作用下,土壤-根系复合体处于平衡状态。在土壤-根系复合体任一点 A 取一微小的平行六面体,其六面分别垂直于坐标轴 x 、 y 、 z 。由于土壤基本承受不了拉力,规定压应力为正,拉应力为负。微元体受力见图 1。

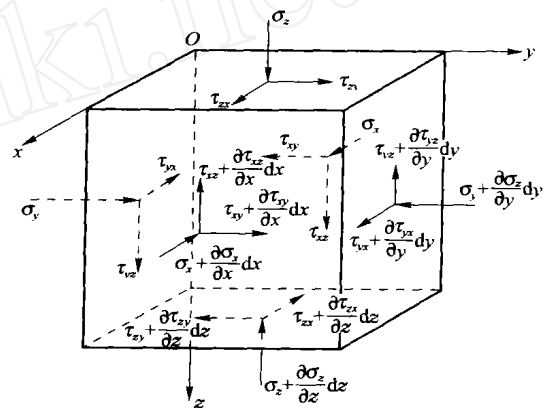


图 1 土壤-根系复合体任意一点的受力状况

Fig. 1 Stress at any point in soil-root composite

根据弹性力学的基本理论,在变形足够小的弹性范围内,虎克定律对各种材料都是适用的。试验表明,对于一个各向异性的矩形截面的弹性体进行轴向拉伸,在应力 $\sigma = F/A$ 的作用下,不仅会产生轴线方向的伸长和横向收缩,而且可能产生剪切应变。广义虎克定律能恰当地描述材料的这一物理特性。由各向异性弹性体理论^[14],可得土壤-根系复合体应力-应变关系

$$\epsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad (1)$$

式中: ϵ_i 为应变分量; σ_j 为应力分量; S 为柔量矩阵; S_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) 为材料的柔性常数。土壤-根系复合体应力-应变关系也可表示为

$$\sigma_i = C_{ij} \epsilon_j \quad (2)$$

式中: C 为弹性矩阵; C_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) 为材料弹性常数。柔量矩阵和弹性矩阵是对称的、互逆的,即

$$S_{ij} = S_{ji}, C_{ij} = C_{ji}; C = S^{-1}, S = C^{-1}.$$

为便于土壤-根系复合体应力-应变关系的分析计算,本研究只考虑植物根系(长纤维)沿 z 轴方向垂直分布的情形,并假定:土壤-根系复合体在平行于 xOy 平面的各截面内一切方向的弹性特性均相同,即 xOy 平面为各向同性面。若 $x、y、z$ 为复合体的 3 个弹性主轴,则 z 轴垂直于各向同性面。基于复合材料力学的基本方法,取 z 轴为纵轴 L (沿根系纤维方向), $x、y$ 为横轴 T (垂直于根系纤维)(图 2)。

设弹性主方向 L 的弹性模量为 E_L , 弹性主方

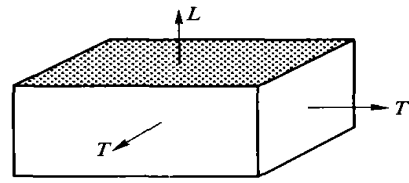


图 2 横向同性的土壤-根系复合体模型

Fig. 2 The isotropy model of soil-root composite on cross-section

向 T 的弹性模量为 E_T ; G_T 和 G_{TL} 分别为 TT 和 LT 平面的剪切弹性模量。考虑到复合体横观各向同性性质,由式(1)得到土壤-根系复合体横向同性的柔性形式本构方程

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ yz \\ zx \\ xy \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu}{E_T} & -\frac{\nu}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E_T} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E_T} & -\frac{\nu}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_T} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ yz \\ zx \\ xy \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: ν 为 L 方向的应力 z 引起的 TL 方向的泊松比; ν_{LT} 为 T 方向的应力 x 或 y 引起的 $L、T$ 方向的泊松比; ν_T 为 T 方向的应力 $x、y$ 引起的 T 方向泊松比; $x、y、z$ 分别为复合体在 $x、y、z$ 方向的应变分量; $xy、yz、zx$ 分别为复合体在 $xOy、yOz、$

zOx 平面的剪应变; $xy、yz、zx$ 分别为复合体在 $xOy、yOz、zOx$ 平面内的剪应力。为得到更加清晰的物理意义,根据式(2)土壤-根系复合体的应力与应变的关系表示为

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{1}{1 - 2\nu_{LT} - \nu_T} \left[E_T \left(\frac{1 - \nu_{LT} \nu_T}{1 + \nu_T} \right) x + E_T \frac{\nu_T + \nu_{LT} \nu_T}{1 + \nu_T} y + E_L \nu_{LT} z \right] \\ y &= \frac{1}{1 - 2\nu_{LT} - \nu_T} \left[E_T \frac{\nu_T + \nu_{LT} \nu_T}{1 + \nu_T} x + E_T \frac{1 - \nu_{LT} \nu_T}{1 + \nu_T} y + E_L \nu_{LT} z \right] \\ z &= \frac{1}{1 - 2\nu_{LT} - \nu_T} [E_T \nu_{LT} x + E_T \nu_{LT} y + E_L (1 - \nu_T) z] \\ yz &= G_{TL} yz \\ zx &= G_{TL} zx \\ xy &= G_T xy \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)即为土壤-根系复合体弹性形式的本构方程。式(3)和(4)表明,在横观各向同性条件下,土壤-根系复合体任一弹性主方向应力的的大小不仅与各个方向应变分量 $x、y、z$ 的大小有关,而且还与各方向的工程常数 $E_T、E_L、\nu_{LT}、\nu_T$ 的大小密切相关,其中与复合体泊松比的关系更为复杂;复合体任一

平面的剪应力与相应平面的剪应变 $xy、yz、zx$ 和剪切弹性模量 $G_{TL}、G_T$ 成正比。

式(3)和(4)中,弹性模量 E_L 表征了复合体沿根系生长(纤维)方向的性质,其强度很大程度上决定于根系本身的材料性质;当复合体受力变形时,植物根系先被拉直,其受力最终转为拉力,增强了复合

体抗拉强度。弹性模量 E_T 反映了复合体垂直于根系(纤维)的力学性质,取决于土粒与土粒之间、土粒与根系之间的黏聚力。剪切模量 G_T 、 G_{TL} 分别表达了 xOy 和 yOz 平面的抗剪能力,它取决于土粒与土粒之间、土粒与根系之间的内摩擦力;当复合体的法向压力、体积密度和含水量一定时,抗剪强度随含根量的增加而提高,且根系愈多愈深愈长,土体结构愈稳定,固土能力愈强。

3 结论

1) 植物根系在土壤中纵横穿插生长,与土壤团粒、水分、微生物、矿质元素、胶体物质等相互吸引生成一种特殊的材料,即土壤-根系复合体。当作用力很小时土壤-根系复合体有微量变形,并且因土壤、根系本身的能量储存而达到平衡;当作用力解除时,复合体将在一定程度上恢复变形。因此土壤-根系复合体可视为由多相组分构成的具有弹性的复合材料。

2) 在弹性和横观各向同性假设条件下,经严格推导得到了表征土壤-根系复合体应力-应变关系的本构方程(式(3)和(4))。公式表明,土壤-根系复合体任一方向的正应力,不仅与各方向的应变分量有关,而且还与各方向的工程常数密切相关,其中与泊松比的关系更为复杂;其剪应力与相应平面的剪应变和剪切弹性模量成正比。一般情况下,式(3)和(4)中各工程常数是一变量。因此,土壤-根系复合体的本构关系一般也呈非线性。

3) 土壤-根系复合体的强度,不仅与土壤和根系的材料特性、组织结构有关,而且还与复合体的根系含量和水分含量相关。弹性模量 E_L 表征了复合体沿根系(纤维)生长方向的性质,其强度很大程度上取决于根系的材料性质;弹性模量 E_T 反映了复合体垂直于根系(纤维)的力学性质,取决于土粒之间和土粒与根的黏聚力;剪切模量 G_T 和 G_{TL} 分别表达了各平面的抗剪能力,取决于土粒之间、土粒与根系之间的内摩擦力。

土壤-根系复合体力学规律的研究是一个影响因素较多、难度较大的新兴的研究领域。本研究的结论对于进一步研究土壤-根系复合体的力学性质,得到符合实际的本构关系,具有一定的理论意义和参考价值。但是活性植物根系与土壤团粒形成的有机复合体,弹性、塑性、脆性、黏性、流变性等交织

混合,远比一般的工程材料的力学特性复杂得多。本研究所得的土壤-根系复合体本构方程,是在大量理论抽象,特别是在弹性、横观各向同性假设下纯理论推导的结果,尚未经实践检验,因此,对于土壤-根系复合体应力-应变规律还需进行大量的试验研究和长期的探索。

参 考 文 献

- [1] 刘国彬,蒋定生,朱显漠. 黄土区草地根系生物力学特性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(3):21~28
- [2] 程洪,张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. 水土保持通报,2002,22(5):20~23
- [3] Diti Hengchaovaich. 香根草技术在工程上的运用——稳定斜坡、减少侵蚀[M]. 香根草研究与展望. 北京:中国农业出版社,1998
- [4] 史敏华,王棣,李任敏. 石灰岩区主要水保灌木根系分布特征与根抗拉力研究初报[J]. 山西林业科技,1994(2):17~19
- [5] 李勇,朱显漠,田积莹. 高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J]. 科学通报,1991,36(12):935~938
- [6] Lowery B, Swan J, Schumacher T, et al. physical properties of selected soil by erosion class[J]. J Soil and Water Cons,1995,50(3):306~311
- [7] 杨亚川,莫永京,王芝芳,等. 土壤——草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J]. 中国农业大学学报,1996,1(2):31~38
- [8] 吴彦,刘世全,王金锡. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 应用与环境生物学报,1997,3(2):119~124
- [9] 代全厚,张力,刘艳军,等. 嫩江大堤植物根系固土护堤功能研究[J]. 中国水土保持,1998,2(3):36~37
- [10] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2005
- [11] 郝彤琦,谢小妍,洪添胜. 滩涂土壤与植物根系复合体抗剪强度的试验研究[J]. 华南农业大学学报,2000,21(4):78~80
- [12] 李小昱. 农业生物力学在农业工程中的应用[J]. 西北农业大学报,1994,22(1):105~109
- [13] 镇江农业机械学院. 农业机械学(上册)[M]. 北京:中国农业机械出版社,1981
- [14] 张锦,张乃恭. 新型复合材料力学机理及其应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1993
- [15] 徐芝纶. 弹性力学(上册)[M]. 北京:高等教育出版社,1982
- [16] 刘成宇. 土力学(第2版)[M]. 北京:中国铁道出版社,2002