

林木根系本构关系

陈丽华, 余新晓, 刘秀萍, 宋维峰

(北京林业大学水土保持学院, 北京林业大学教育部水土保持重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 采用抗拔法进行了冷杉、杜鹃、冬瓜杨、糙皮桦、花楸、英迷、卫矛等 7 种树木根系应力-应变关系的实验研究, 得出抗拔法可以用于对根系应力-应变关系进行检测。分别利用双曲线和二次抛物线模型模拟上述不同树种根系的应力-应变关系, 并给出了相应的模型试验参数。模拟结果表明: 根系的应力-应变关系用双曲线模型模拟误差较大, 而用抛物线模型模拟则比较理想。对不同林木的根系, 其应力-应变关系可近似用统一的本构关系描述, 模型形式: $\sigma/\sigma_0 = 1.6475(\varepsilon_a/\varepsilon_0) - 0.6917(\varepsilon_a/\varepsilon_0)^2$ 。

关键词: 林木根系; 本构模型; 双曲线模型; 抛物线模型

中图分类号: S71

文献标识码: A

森林生态系统由于其强大的根系对土壤的固持作用^[1-11], 在人工恢复生态的过程中, 在水土保持工作中, 特别是在一些非生物措施不可的项目以及可以利用生物软措施代替或部分代替硬性的工程措施中, 根系的作用显得特别重要。目前关于根系的潜在能力、发育组成材料的性质的研究甚少。植物根系类似于土壤中锚杆的作用, 但目前为止缺乏强有力数据支持; 另外在应用生物软措施固土护坡的时候, 不仅要考虑植物对所处环境的适应性和根系深扎土壤的程度^[12-16], 也应该对所选择和应用的植物根系的力学指标^[17, 18]有所了解, 才能做到科学合理, 避免盲目, 特别是用生物软措施代替部分工程措施作用的情况下, 尤其应考虑植物根系的固土能力, 如抗拉强度等。通常情况下植物根系受拉力作用的概率比受剪切力作用的概率要大, 因为根系与土壤在共同黏附力作用下形成活性有机体, 在土壤受侵蚀条件下根系受到的剪切压力会变形拉直从而转为拉力的作用, 因此根系的本构关系对其护坡性能具有重要的意义。

由于树木作为生命体生长的复杂性, 不同树种、林龄以及树木根系的不同长度、不同根径都会对本

构关系的建立产生影响, 本文综合各种因素的影响建立数学模型, 用一个较简化的根系本构关系来描述不同树种的拉拔受力变形关系, 以期可以对实际造林工作有一定的指导作用。

1 试验方法与试验结果

试验所用材料取自长江上游贡嘎山地区, 分别是冷杉、杜鹃、冬瓜杨、糙皮桦、花楸、英迷、卫矛等 7 种树种的根系, 其物理性质指标如表 1 所示。对上述树种的不同根径、不同根长的根系共进行了 273 组拉拔试验。实验材料中除冷杉根系分别取自幼龄林、中龄林、成熟林和过熟林外, 其余树种由于自身林龄相差不显著, 如冬瓜杨主要是中龄林, 故不再划分林龄。

试验仪器系统包括测量精度为 0.01%、灵敏度为 0.2UV 分度的电子测量仪 (KX3900); 美国产 20KNS 剪切型拉力传感器 (USLOAD); 以及一些自制的配套装置。用上述工具对不同根径 (2~30 mm)、不同根长 (40~100 cm) 的单根进行拉拔试验, 观测记录单根整个拉伸过程不同时间、不同加载

收稿日期 (Received date): 2006-10-11; 改回日期 (Accepted): 2007-01-03.

基金项目 (Foundation item): 中国科学院成都山地灾害与环境研究所开放基金 2005 年资助项目 [Institute of Mountain Hazards and Environment CAS]; 国家自然科学基金资助项目 30571531 [Fondation of China natural Science (30571531)]

作者简介 (Biography): 陈丽华 (1957-), 女, 汉, 北京市人, 博士, 教授, 研究方向: 森林水文、土壤侵蚀、城镇规划, 010-62336108, c_lhua@bjfu.edu.cn [Chen Lihua (1957-), Female Majority Beijing Doctor Professor Research interest forest hydrology soil erosion urban plan]

条件下的变形。为反映根系现实力学特性, 本试验在测定时对根系未作任何前处理, 样品采回后, 轻轻冲去泥土, 擦干水分, 即作测定。

不同树种根系在拉拔情况下的应力应变关系

($\sigma - \epsilon_a$)如图 1所示。当根系受力较小时, 其应力-应变呈线性关系; 当受力达到其极限的 50% ~70%时, 应力-应变关系表现为非线性弹性的曲线形状。

表 1 根系的主要物理性质指标

Table1 Physical index of the root system

树种	根皮颜色	有无明显分叉	须根量	根径均一度	根皮形状	木质部颜色	根系顺直程度
冷杉	红色	有	多	均一	纵裂, 有小片剥落	白	顺直, 少弯拐
杜鹃	灰色	有	多	均一	茎弯曲, 多弯拐	白	顺直, 少弯拐
冬瓜杨	淡黄	无	极多	不均一	光滑, 有小片剥落	白	不顺直, 多拐弯
糙皮桦	红褐色	无	少	不均一	光滑	略黄	不顺直, 多拐弯
花楸	淡黑褐色	无	多	均一	光滑	白	顺直, 少拐弯
荚迷	黑褐色	无	中	均一	纵裂	白	顺直, 少拐弯
卫矛	黄色	无	极少	均一	光滑	白	顺直, 少拐弯

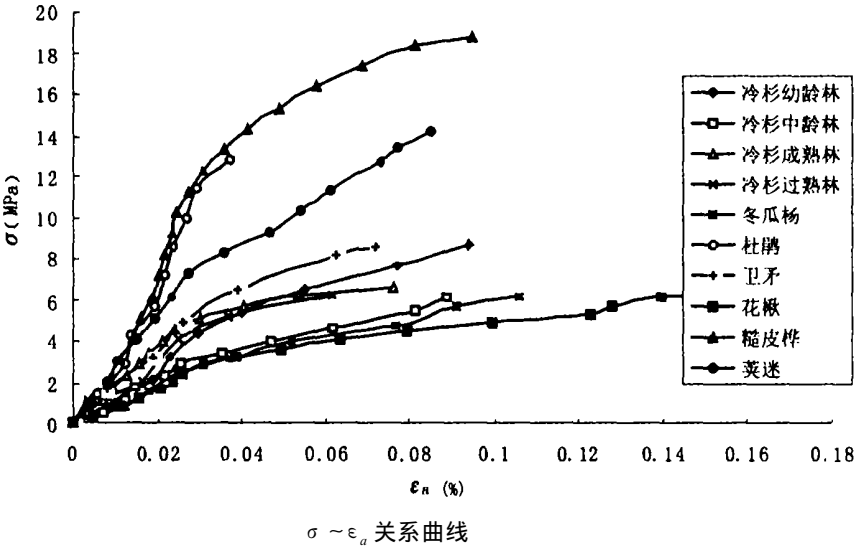


Fig 1 Curves with σ and ϵ_a

2 林木根系本构模型

2.1 双曲线模型

根系抗拉应力-应变曲线可以用双曲线关系表示它的非线性特征。双曲线模型可表示为

$$\sigma_1 = \epsilon_a / (a + b\epsilon_a) \tag{1}$$

式中 σ_1 为应力, ϵ_a 为应变, a , b 为模型试验参数。 a 的倒数表示 $\sigma - \epsilon_a$ 曲线的初始切线斜率(即初始切线模量), b 表示破坏应力渐近值的倒数。可以将式(1)改写为如下形式

$$\epsilon_a / \sigma_1 = (a + b\epsilon_a) \tag{2}$$

2.2 抛物线模型

考虑不同树种根系在不同直径、不同根长情况下的抗拉应力-应变曲线, 采用二次抛物线模型进行模拟。抛物线模型的方程为^[7]

$$\sigma = \sigma_0 [A(\epsilon_a / \epsilon_0) - B(\epsilon_a / \epsilon_0)^2] \tag{3}$$

式中 σ_0 为最大应力; ϵ_0 为最大应力时的应变值; A , B 为模型试验参数。式(3)可以改写为

$$\sigma / \sigma_0 = A(\epsilon_a / \epsilon_0) - B(\epsilon_a / \epsilon_0)^2 \tag{4}$$

3 模型验证

3.1 双曲线模型的验证

式(2)表明, $\epsilon_a / \sigma_1 - \epsilon_a$ 应为直线关系, 根据不

同树种根系的抗拉应力-应变试验结果分析,其结果如图 2 可见二者并不完全呈线性关系。 $\epsilon_a/\epsilon_0 - \sigma/\sigma_0$ 关系在应力-应变的弹性阶段和弹塑性阶段变化趋势并不一致。拟合曲线和实测曲线结果在弹性阶段吻合有一定误差,但在进入弹塑性阶段时二者吻合较好。表 2 给出不同树种根系的应力-应变关系按双曲线模型得到的 a, b 参数值。

3.2 抛物线模型的验证

以 ϵ_a/ϵ_0 为横坐标, σ/σ_0 为纵坐标,对不同树种根系的抗拉应力-应变曲线点绘成图,依据式 (4)对试验数据进行二次回归分析,其结果如图 3 所示。模型试验参数 A, B 见表 2。

图 3 显示实测的应力-应变关系曲线和抛物线模型的吻合情况较双曲线模型有明显改善。除了个别线段有一定的偏差外,大部分吻合效果令人满意。说明抛物线模型可以较好的反映实测根系拉拔时应力-应变曲线的基本特征。

通过对实测资料和试验参数 A, B 值进行分析,将试验数据汇总后点绘成图,并进行二次拟合分析,其结果如图 4 所示。图中显示实测值和二次拟合曲线较为一致,表明用抛物线模型表征的材料应力-应变关系归一化性能较好,对不同树种、根长、根径的树木根系,其应力-应变关系近似可用统一的公式表示。

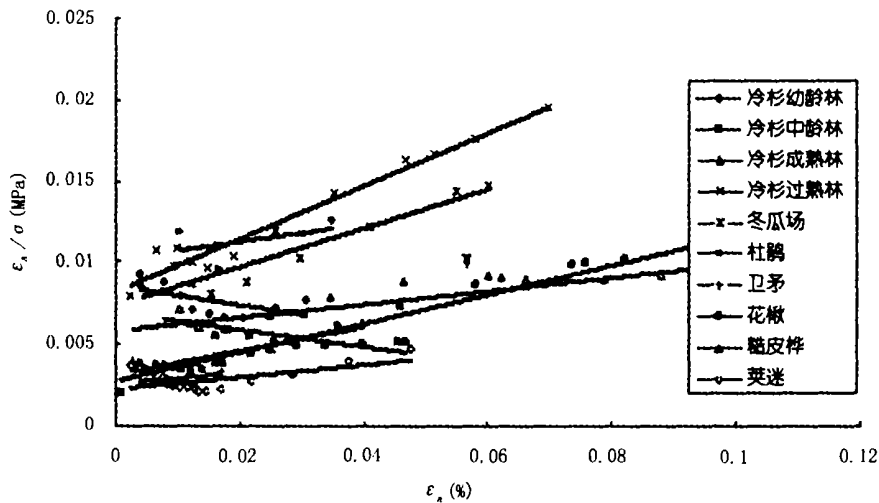


图 2 不同树种根系的关系曲线
Fig. 2 Curves of roots with different trees

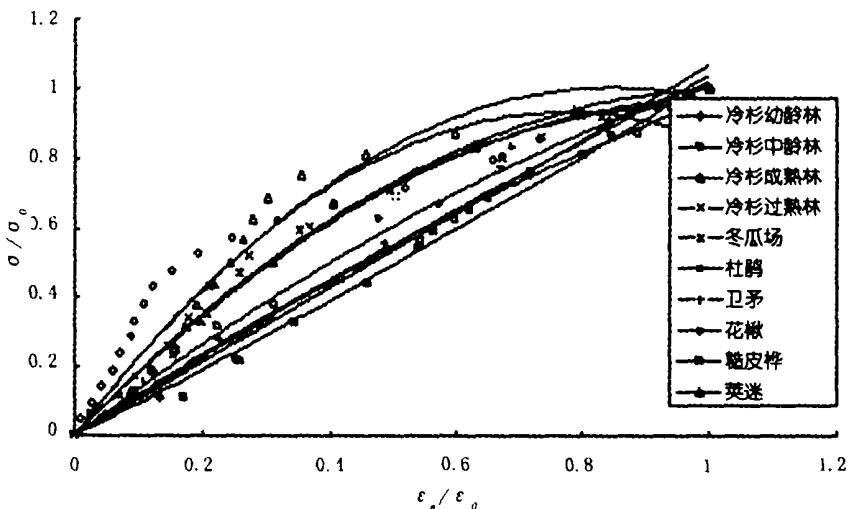


图 3 不同树种根系的 $\epsilon_a/\epsilon_0 - \sigma/\sigma_0$ 关系曲线

Fig. 3 $\epsilon_a/\epsilon_0 - \sigma/\sigma_0$ curves of roots with different trees

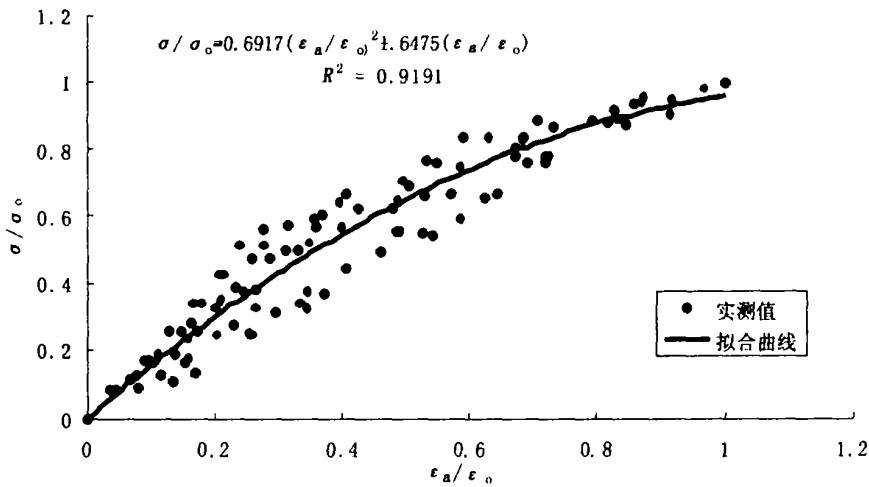


图 4 统一的 $\sigma/\sigma_0 - \epsilon_a/\epsilon_0$ 关系曲线

Fig 4 The unifom $\sigma/\sigma_0 - \epsilon_a/\epsilon_0$ curves

表 2 模型参数
Table 2 The model parameter

树种	双曲线模型		抛物线模型	
冷杉幼龄林	a	0.008 6	A	1.327 0
	b	0.061 0	B	0.252 5
冷杉中龄林	a	0.007 0	A	1.071 8
	b	-0.050 4	B	0.014 6
冷杉成熟林	a	0.003 2	A	1.969 4
	b	0.073 9	B	0.961 0
冷杉过熟林	a	0.008 2	A	1.811 3
	b	0.162 3	B	0.880 3
冬瓜杨	a	0.007 4	A	1.902 9
	b	0.118 3	B	0.928 6
杜鹃	a	0.010 2	A	1.453 3
	b	0.055 4	B	0.422 3
卫矛	a	0.002 5	A	1.441 1
	b	0.041 7	B	0.412 3
花楸	a	0.002 7	A	1.824 9
	b	0.088 9	B	1.028 3
糙皮桦	a	0.005 8	A	1.065 4
	b	0.040 7	B	0.123 0
黄迷	a	0.002 4	A	2.652 9
	b	0.035 3	B	1.645 9

根据图 3 的拟合分析结果, 树木根系统一的抛物线模型本构方程可表示为

$$\sigma/\sigma_0 = 1.6475(\epsilon_a/\epsilon_0) - 0.6917(\epsilon_a/\epsilon_0)^2$$

4 结论

4.1 准确性

不同树种根系抗拉的应力-应变关系按双曲线模型误差较大, 模拟结果并不十分理想, 但用二次抛物线模型描述则比较理想, 且应力-应变关系的归

一化性能较好。对不同树种的根系, 其应力-应变关系可统一用这一线型的本构关系来近似描述。

4.2 区域性

尽管试验中根系的选取是随机的, 具有代表性, 但由于各地气候和土壤条件有差异, 可能导致根系的性质亦有一定差异。因此建立的本构模型与给定的经验参数只适用于环境条件与之相同的地区。

4.3 适用性

植物根系的本构关系可作为衡量其力学特性的指标之一, 利用拉拔法试验可以建立不同树种根系本构模型公式。实验证明, 林木根系的应力-应变之间有很好的抛物线相关关系, 文中建立的基准曲线与数学模型, 相关性好, 误差小, 可信度高, 在环境条件近似的区域可以推广使用。

参考文献 (References)

[1] Xie M ingshu. study on the Constitutive relation of forest root system [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* 1990 4 (3): 7 ~ 14
[解明曙. 林木根系固坡力学机制研究. 水土保持学报. 1990 4 (3): 7 ~ 14]
[2] Chen Lihua Yu X inxiao Zhang Dongsheng Study on whole tree vertically tensile strength[J]. *Resources Science* 2004 26 39 ~ 43
[陈丽华, 余新晓, 张东升. 整株林木垂向抗拉试验研究. 资源科学. 2004 26 39 ~ 43]
[3] Sun Lila Zhu jinzhao Integrative Research and Assessment of Water and Soil Conservation forest[M]. Beijing Science and technology of China Press 1995. [孙立达, 朱金兆. 水土保持林体系综合效益研究与评价[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995]
[4] Sun Lila Sun Baoping Qi shi Theoretics and Practice of Comprehensive Control of Small Valley[M]. Beijing Science and Technology of China Press. 1992 [孙立达, 孙保平, 齐实. 小流域综合治理

- 理理论与实践[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.]
- [5] Tang Bangxing, Liu Suqing. Debris flow and Preventing and Controlling of Sichuan Province of Zang and Qiang Nation[M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology Press, 1993. [唐邦兴, 柳素清. 四川省阿坝藏族羌族自治州泥石流及其防治研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993.]
- [6] Nadezhda Nadezhdina, Jan Cernak. Instrumental methods for studies of structure and function of root systems of large trees[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54: 1511~1521.
- [7] M. J. Crook, A. R. Ennos, J. R. Banks. The function of buttress roots: a comparative study of the anchorage systems of buttressed (*Aglaia* and *Nephelium ramboutan* species) and non buttressed (*Malbus wrayi*) tropical trees[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1997, 48: 1703~1716.
- [8] M. J. Crook, A. R. Ennos. The increase in anchorage with tree size of the tropical tap rooted tree *Malbus wrayi* King (Euphobiaceae) [J]. *Annals of Botany*, 1998, 82: 291~296.
- [9] M. J. Crook, A. R. Ennos, J. R. Banks. The function of buttress roots: a comparative study of the anchorage systems of buttressed (*Aglaia* and *Nephelium ramboutan* species) and non buttressed (*Malbus wrayi*) tropical trees[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1997, 48: 1703~1716.
- [10] M. P. Coutts, C. C. N. Nielsen, B. C. Nicoll. The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers[J]. *Plant and Soil*, 1999, 217: 1~15.
- [11] S. B. Mickovski, A. R. Ennos. Anchorage and asymmetry in the root system of *Pinus peuce*[J]. *Silva Fennica*, 2003, 37: 161~173.
- [12] A. Di iorio, B. Lasserre, G. S. Scippa, et al. Root system architecture of *Quercus pubescens* trees growing on different sloping conditions[J]. *Annals of Botany*, 2005, 95: 351~361.
- [13] E. Danjo, H. Sinoquet, C. Godin, et al. Characterisation of structural tree root architecture using 3D digitizing and AMAPro software [J]. *Plant and Soil*, 1999, 214: 241~258.
- [14] A. Watson, C. Phillips, M. Marden. Root strength, growth and rates of decay: root reinforcement changes of two species and their contribution to slope stability[J]. *Plant and Soil*, 1999, 39~47.
- [15] D. Chiatante, M. Samatini, S. Fusco, et al. Modification of root morphological parameters and root architecture in seedlings of *Fraxinus omus* L. and *Spartium junceum* L. growing on slopes[J]. *Plant Biotechnology*, 2003a, 137: 47~56.
- [16] D. Chiatante, G. S. Scippa, A. Di iorio, et al. The influence of steep slope on root system development[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2003b, 24: 247~260.
- [17] A. Stokes, C. Mattheck. Variation of wood strength in tree roots [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47: 693~699.
- [18] K. J. Niklas, F. Molina Freaner, C. Tinoco-Ojanguren, et al. The biomechanics of *pachycereus pringlei* root systems[J]. *American Journal of Botany*, 2002, 89(1): 12~21.

Study on the Constitutive Relation of Forest Root System

CHEN Lihua YU Xinxiao LIU Xiuping SONG Weifeng

(College of Water and Soil Conservation, BFU; Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstracts A research was conducted on pull out method for determining the root stress-strain relationships of *Abies fabris*, *Rhododendron*, *populus pordonii*, *Betula utilis*, *Sorbus folgeri*, *Viburnum cordifolium*, *Euonymus alburanoides* etc. A conclusion was reached that pull out method might determine the stress-strain relations of root system. The stress-strain relationships of different forest root systems above are simulated by the hyperbolic and parabolic models, and the testing parameters of models are given. The simulation results show that the hyperbolic model to analyze the stress-strain relationship of the eco-material has a larger error, but the parabolic model to describe its stress-strain response is very reasonable. A uniform constitutive relation can be used to describe the stress-strain relationship of different root systems, and its expression is $\sigma/\sigma_0 = 1.6475(\epsilon_a/\epsilon_0) - 0.6917(\epsilon_a/\epsilon_0)^2$.

Key words: root system; constitutive model; hyperbolic model; parabolic model