

乔木侧根对土体的斜向牵引效应

II 野外直测

周 跃¹ 徐 强² 骆华松² 李玉辉²

(1 云南省地理研究所 昆明 650223; 2 云南教育学院地理系 昆明 650223)

提 要 根据乔木侧根对土体的斜向率引效应原理和数学模型, 以云南松林为例, 进行了野外直接剪土测试。结果表明: 在表层根际土中(0~20cm)松树侧根能在相同的垂直截面上平均提供 577.23N 的斜向牵拉力, 使根际土层的抗滑力提高了 38.78%, 把根际土层的抗张强度提高了 5.77kPa。同时发现, 侧根牵引效应的量值随根生物量大小的影响, 两者具有正相关关系。

关键词 乔木侧根 牵引效应 侵蚀控制 野外直测

分类号 《中图法》S157

根据本文第 I 部分^[1], 设想一个在坡面上的土壤长方体或理想土墩(图 1-a), 上顶面即为坡地表面, 四周和下底面仍与周围土壤连为一体。假如把这一理想土壤在其四侧面与周围土体切断开(图 1-b), 并沿平行坡面的方向牵拉土墩, 对其在下底面(剪切面)施加剪切力, 该土墩将在下底面由于土壤本身的抗剪强度产生相应的抗剪阻力 F_r 。如果土墩后侧有侧根穿入(图 1-c), 土墩在受牵拉时, 这些根的根土粘合力 and 根内抗张强度将被调动起来, 侧根产生牵引阻力(F_T , N)并部分抵消牵拉力(F_p , N)。 F_T 使受拉土墩获得了一个额外的牵拉阻力, 使其在不改变下底面土壤本身实际抗剪强度的情况下能承受更大的牵拉力。但是如果土墩中没有根, F_p 就会全部直接用于剪切受拉土墩。

理想土墩的概念突出了侧根加强根际土层斜向或水平向抗滑力的构想。通过设立这样的理想土墩, 并在可知的情况下对其进行牵拉实验, 便能够对乔木侧根的牵引效应进行了野外直测。过去, 国内外对测根斜向牵引效应的研究局限于定性的探讨^[2,3], 对侧根作用的力学机制缺乏认识。本研究针对这些问题, 提出了新的思路和技术^[4,5]。

1 研究方法

1.1 基本思路

在云南松林地, 可以在任何一点设想一个理想土墩, 把在土墩与稳定土体间切开的垂直沟槽视为地面由于滑动而产生的张力缝隙。我们开凿了两组土墩, 一组有根穿过, 一组无根留下(全部侧根在土墩

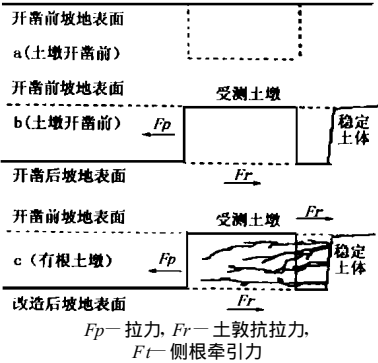


图 1 斜坡上理想土墩、侧根及其作用示意图
Fig 1 Sketch diagram of the ideal cuboid, lateral roots and their effect

* 国家自然科学基金(编号 49201003 49871054), 云南省应有基础研究基金(编号 98D007m), 云南省科委主任基金(编号 97D006R)、中国留学回国人员科研启动基金联合资助项目。
收稿日期: 1998-05-01; 改回日期: 1998-07-24
©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

四个侧面被切断清除), 假定两组土墩土壤性质的差异可以忽略, 并且有根土墩样中的侧根都以同样的方式参予牵引效应。当引入牵拉力 F_p 时, 两组试样以不同的方式、不同的量值抵抗 F_p 。我们把这些差异看成是侧根牵引阻力 F_T 产生的结果, F_T 在土壤垂直截面单位面积上的量值就是根际土层增加了的平面内抗张强度。本研究只考虑从土墩后面伸延进去的侧根, 它们在牵引过程中承受张应力。

1.2 野外直接测试

我们采用的实验装置系统分 4 部分 (图 2): 产生牵引力的曲杆式千斤顶; 使牵引力作用到土墩上的剪切箱; 记录土墩受力位移的位移表以及记录拉力的 YJ-X 静态电阻仪, 后者又分为电阻表和拉力传感器两部分。

供测试用的土墩宽 40cm, 长 35cm, 高 20cm。在它两侧面及背面分别开凿深 20cm、宽 5cm 的沟槽, 开凿中尽可能多地保留出露的侧根。这些侧根穿过一个面积为 $(40\text{cm} + 5\text{cm} + 5\text{cm}) \times 20\text{cm}$ 或 $1\,000\text{cm}^2$ 的垂直截面。在两侧沟槽中也

有横向侧根穿入, 这些根在实验中不予考虑并被切断清除。我们一共开凿并测试了 15 个有效土墩, 其中 4 个为对比样, 它们四周的所有侧根被切断清除。牵拉力 F_p 尽量均匀地增加, 把剪切箱的平均位移率控制在 0.1m/s 。土墩在剪破后, 撤开剪切箱, 挖出土墩中所有的侧根并就地称重, 查看侧根生物量与侧根牵引阻力的关系。

在牵引过程中, 拉力传感器将电信号传给电阻表, 表上即可读到任一时刻的电阻值 ($\epsilon, \text{k}\Omega$)。用公式 (1, 2 和 3), 可以算出该时刻作用在土墩上的牵拉力 F_p , 当土墩被剪破时的最大牵引阻力 F_{Tf} 和根际土层为了 F_T 而在给定截面上增加的抗张强度 ($\Delta\tau_T, \text{kPa}$)

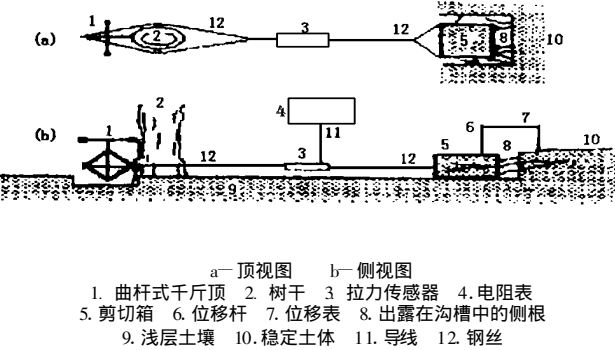


图 2 野外直剪测试的装置系统示意图
Fig 2 Sketch diagram of the instrument system used in situ

$$F_p = \tau k, \tag{1}$$

$$F_{Tf} = F_{pf} - F_{r\max}, \tag{2}$$

$$\Delta\tau_T = F_T / A_b, \tag{3}$$

式中 k 是电阻—拉力转换系统, 在实验室标定为 $0.324\text{kg/k}\Omega$ 或 $3.18\text{N/k}\Omega$, F_{pf} 是 F_p 在土墩被剪破时的最大牵拉力, $F_{r\max}$ 是土壤本身可以提供的最大抗拉力, A_b 为给定垂直横面积 ($A_b = 1000\text{cm}^2$).

2 结果与分析

2.1 测试观察

牵拉初期, 在剪切箱传来的水平力的挤压下, 受测土墩并不明显移动, 仅仅在后侧面出现不同程度的变形, 土壤受挤压向上膨胀, 拉力 F_p 迅速上升, 但整个土墩抵抗着 F_p 而不产生明显位移。这时位移记录仪显示的一些微小位移一部分由于土壤的变形引起, 另一部分产生于肉眼不易发现的土墩前移。当 F_p 增加到一个特定的量值 F_{pf} 时, 位移也达到一个特定的距离或称临界位移, 土墩下底面被剪破并迅速向前移动。无根样土墩在剪破后被很快拉离原来位置, F_p 也降低到残余阻力的量值。有根样的 F_p 在剪破后并不迅速减低, 有时甚至还在一定程度内回升。这是因为不同侧根在不同时间被拉断, 有的侧根在土墩剪破后的短时间内仍抵抗着 F_p 。绝大多数情况下, 侧根在测试中被拉断, 极少数被拔出。

2.2 拉力与位移及其相互关系

一般来讲, 有根土墩样在临界位移时的拉力(F_{pf})的量值比无根土墩样高, 表明它们有较高的抗拉力。11 个有根样中 F_{pf} 的平均值为 1 493. 24N(表 1); 4 个无根样的 F_{pf} 平均 935. 51N。有根样的临界位移达到平均 5. 0mm, 无根样的只有 2. 5mm, 说明前者能承受较高的临界位移。

表 1 受测土墩的牵拉力、牵引阻力、抗张强度增量和根生物量测试结果
Table 1 Pulling force, tractive resistance, tensile strength increase and root biomass

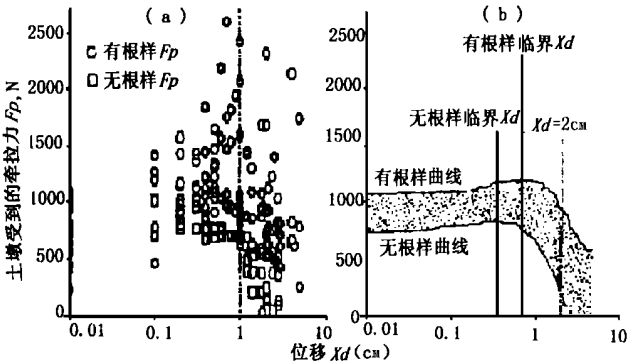
比较内容	F_{pf} (N)	临界 X_d (mm)	F_{Tf} (N)	增加的 F_{pf} (%)	$\Delta \tau_T$ (kPa)	根生物 量(g)	平均 F_{pf} (N)	平均 F_{Tf} (N)	平均增加 的 F_{pf} (%)	平均 $\Delta \tau_T$ (kPa)
有根土墩样	C1	1426. 16	3	525. 06	36. 56	5. 25	1488. 33	577. 23	38. 78	5. 77
	C2	1131. 13	3	220. 09	19. 45	2. 20				
	C3	2605. 42	7	1694. 32	65. 03	16. 94				
	C4	1864. 03	4	952. 93	51. 12	9. 53				
	C5	1369. 43	3	458. 33	33. 47	4. 58				
	C7	2068. 45	10	1157. 35	55. 95	11. 57				
	C10	905. 54	7	- 5. 56	- 0. 61	- 0. 056				
	C11	1159. 73	3	248. 63	21. 44	2. 48				
	C12	1528. 30	8	617. 20	40. 38	6. 17				
	C14	1169. 26	4	258. 16	22. 08	2. 58				
	C15	1134. 31	3	223. 21	1968	2. 23				
无根土墩样	C6	1019. 93	3				911. 10			
	C8	899. 19	2							
	C9	772. 09	2							
	C13	953. 20	3							

在该实验点, 受测土样的位移 X_d 随拉力 F_p 的增加而增加。我们记录了该 F_p 在不同 X_d 时的量值。如果用 X_d 作为一个自变量并标注在从 0. 01~10cm 的对数坐标轴上, 再用所有的有根样对应着它们不同 X_d 的 F_p 值作为第一因变量, 用 4 个无根土样所有的对应着不同 X_d 的 F_p 作为第二因变量, 可绘出有根与无根样的 F_p-X_d 散点图及回归曲线(图 3)。该图表明, 施加到土墩的 F_p 因时间试样不同而有很大差异(图 3a)。这个差异既反映在两试样组之间, 也反映在每一试样组之内。图 3b 分别给出了 11 个有根样和 4 个无根样组 F_p-X_d 关系。由图 3b 可见, 有根组的临界 X_d 和曲线峰值均高于无根组, 表明有根样能经受较大牵拉变形和较高牵拉力。两曲线间的点区代表了产生的侧根牵引力(F_T , N)。

表 1 和图 3 表明, 云南松侧根的确提高了受测土墩对 F_p 的抵抗力, 有根组相对高的 F_p 说明施加到土墩上的拉力已经产生了侧根 F_T , 使土墩因此获得了附加抗拉力。在牵拉测试中, 有根样的 F_p 在土样被剪破前不断上升而且超过了无根样或纯土壤的最大抗拉力, 其 X_d 也不断增加最后超过了纯土样的临界位移。这时有根样持续抵御着 F_p , 并不出现明显位移。

3. 3 侧根牵引阻力分析

在林内地选定的长方形地段中各处土壤的性质相对一致, 土壤抗剪强度不会有较大差异。可以用 4 个无根样的最大抗拉力 F_{pf} 代替纯土壤的 F_{rmax} 。实验结果表明, 无根样的平均 F_{pf} 为 932. 51N(表 1), 该值即为 F_{rmax} 的代



a- 11 个有要有根样和 4 个无根样的测试结果,
b- 两组试样拉力-位移关系的一般模式

图 3 受测土墩的拉力与位移的关系
Figure 3 Relationship between the pulling force and the displacement of the pulled soilcuboid

替值。用公式(2)可得出,在临界位移时侧根的牵引阻力($F_T f$, N)平均为 577.23 N。受 $F_T f$ 的影响,有根组的平均抗拉力增加了 38.78%。

如表 1 所示,有较高侧根生物量(Mr , g)的土墩一般都测得较高的 F_T 。统计分析表明, F_T 与 Mr 呈正相关关系,两者的线性回归关系为

$$F_T = 4.43 Mr - 472.56 \qquad (r = 0.69, n = 11) \qquad (4a)$$
$$\text{或 } F_T = 4.43 (Mr - 106.5) \qquad (4b)$$

线性方程(4b)可以被看成是 $F_T = a_T(Mr - Cr)$ 的形式。其斜率在本研究中被称作牵引系数,以 a_T 表示,物理意义是单位根量所提供的牵引阻力 F_T 。其数值大小对于确定云南松护坡作用潜能具有重要理论意义。 Cr 的影响因素尚不完全清楚,本研究认为可能与云南松侧根较低的抗张强度和根土粘作用方式有关。

3.4 抗张强度的增加量

用公式(3)可以计算出云南松侧根对根际土层抗张强度的增加量($\Delta \tau_T$)。如表 1 所示,在给定的 Ab 上,侧根把根际土层的抗张强度平均提高了 5.8 kPa。

4 讨论与结语

4.1 与牵引效应有关的机械过程

本研究认为水平牵引效应应包含有三种机械作用: 1. 当滑动发生时(在我们的测试中相当于开始牵引剪切箱时),滑力在某一受力点牵动侧根并使其产生根内张力; 2. 这些根以自身张应力的形式顺其延伸方向把部分滑动力(或牵拉力 F_P)传递到根际土层另一较低应力点(在测试中即剪切箱后面的稳定土体),并且调动了该点土体对该张力(或 F_P 的一部分)的阻力; 3. 这些侧根又把调动起来的阻力以根内张力的形式传递到滑动力最早作用的地点(即受拉土墩)并参与抗御滑动力(F_P)。在我们的实验中,松侧根一端自然嵌在土墩中,另一端也紧紧锚固在稳定土体中,从而形成一连续体,保证了上述力学过程的实现。这里的根内张力大小受根抗张强度影响,它通过根土粘合作用产生对周围土壤的牵引阻力 F_T ; F_T 越高,被抵消的 F_P 越多。仅当拉力足够高且 F_T 抵消后剩下的 F_P 仍高于纯土体的最大剪切力(F_{rmax})时,土墩将被剪破;此时土墩已抵御了高于纯土的 F_{rmax} 的 F_P 。即使在剪破后的短时间内土墩仍有较高抗拉力。

4.2 关于 F_T 的潜在量值

侧根牵引阻力 F_T 的模型预测方法和结果已在前文^[1]作了介绍。相比较而言, F_T 的模型预测结果明显高于实测值。这与两种方法的差异有关。模型方法假设所有的根都同时受力和同时被拉断,它同样假设所有的根都紧紧地嵌埋于土壤中,而实际情况并非如此。另外除了本研究考虑的顺坡而下的纵向侧根,模型中还包含了一些横走侧根,这些根通常不象前者那样提供较高的 F_T ,而模型预测把这些根当作纵向根处理,使模型值有所夸大。另一方面,野外直接测试结果也出现一定的过低估计。首先是土墩后面挖出的沟槽使穿过的根失去了它们原有的牵引支撑点,因而产生的 F_T 值低于实际值。其次是直径 < 3mm 的根在挖凿沟槽时大多被破坏,它们未被包含进测量中。细根的抗张强度较高,在总根数中占有较大比重,它们对 F_T 的贡献本来是很大的。主要由于这些原因,两种方法定量的结果有一定差异。然而,所得的直测值和模型值给出了 F_T 的真实范围。如果把直测值作为对 F_T 的最低估计值,可以确定模型值对该值的折算系数。在本研究中该系数约为 0.13。

松树侧根凭借其牵引阻力,通过牵引效应增加上层根际土层的平面内抗张强度,加固土体。松树主根具有较好的重直锚固作用,它能把增加了抗张强度的根际土层锚固到更深的土体上。有了这些作用,松树的牵引效应能够抑制浅层土体移动,稳定斜坡。另外,松树的侧根在浅层有较大的密度,而浅层土壤的强度较低,侧根可以充分地加固较松散的浅层土壤。这一点对斜坡保护具有十分重要的意义。在

侧根的牵引效应参予下, 浅层土壤受到加固, 同时还保护了深层土壤。

致谢: 作者对资助、支持、指导、帮助和提供设备的单位和个人(见本期第7页)表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 周跃, 徐强, 络松华等. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应 I 原理和数学模型. 山地学报(原《山地研究》), 1999, 17(1): 4~9
- [2] Coppin, N. J. and Richards, I. G. . Use of vegetation in civil engineering . CIRIA, Butterworths, 1990.
- [3] 周跃. Effect of the Yunnan Pine (*Pinus yunnanensis* Franch) on Soil Erosion Control and Soil Reinforcement in the Hutiaoxia Gorge, Southwest China. ph. D Thesis. The University of Hull, March 1997.
- [4] 周跃, D. Watts等. The traction effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on soil reinforcement; a direct in situ test . Plant and Soil(1997) 190: 77~86.
- [5] 周跃, D. Watts, 李玉辉, 陈晓平. A case study of effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on shallow soil reinforcement. Forest Ecology and Management, 1998, 103: 107~120.

第一作者简介 见《山地学报》(原《山地研究》)本期第8页

TRACTION EFFECT OF LATERAL ROOTS OF TREES II IN SITU DIRECT REST

ZHOU Yue¹ XU Qiang² LUO Hua-song² LI Yu-hui²

(¹ Yunnan Institute of Geography, 20 Xuefu Road, Kunming 650223;

² Yunnan College of Education, 6 Xuefu Road, Kunming 650223)

Abstract

Lateral roots of trees are provided with mechanical stabilizing effect on the rooted soil, through their traction effect (see detail in the abstract of part one of this series paper). To verify whether or not a traction effect exists in the roots system of Yunnan pine, a direct in situ test was conducted in the Hutiaoxia Gorge area, SW China, taking Yunnan pine forest (*Pinus yunnanensis* French.) as an example. The method used in this study to examine the traction effect in situ is a new technique, being the first of this kind in the world. Though some improvement still needed, it successfully obtained some preliminary results.

To test the traction effect, two groups of soil cuboids were selected, one group with roots and one without. When pulled, the two groups resisted the force pulling force to different extents. This difference is considered to be an indication of the result of the traction effect. The instrument system, consisting four main parts, and their connections were carefully designed. After the experiments with the instrument system, the magnitude of the pine's traction effect could be obtained, using a special group of equations.

Based on the sampled soil cuboids, generally, the pulling force of the rooted samples at critical displacement is higher than those of the non-rooted ones; the force on the rooted samples averaging 1488.33N, compared with the one of the non-rooted samples of 911.10N. The rooted cuboids reach their maximum pulling force a bit later (average displacement reaches about 5.0mm) than those of the nonrooted ones (only average 2.5mm). Calculation shows that, most of the rooted samples had received an increased tensile strength, on the set vertical cross-section area of 1000 cm² in the uppermost soil layer, ranging from 2.2kPa to 16.9kPa. The mean tensile strength increase at the topmost soil layer was 5.8 kPa, which is considerable. There is certain relationship between the traction force and the biomass of the lateral roots; the former increases positively with the later.

Key Word Trees' lateral roots, Traction Effect, Erosion Control, Direct Test

关于全省期刊统一启用新记者证的公告

为了保障新闻记者的正常采访活动,维护新闻记者的正当权益,加强对记者证的管理,国家新闻出版署决定统一换发全国新闻机构的记者证,并于1998年9月1日起正式启用新记者证。现将有关事项公告如下:

一、新记者证由国家新闻出版署统一制作。其中新的期刊记者证长7cm,宽10.9cm,为深蓝色羊皮封面,封面左上角有“期刊”二字;内页为浅蓝色,印有国家新闻出版署章、“记者证核发专用章”,并加盖有“四川省新闻出版局”钢印。

二、我省期刊新记者证编号证编号为“K5xxxx1xxx”或“K51xxxx2xxx”。“51xxxx”为期刊的“国内统一刊号”;“1”表示中央在川期刊,“2”表示地方办的期刊;后3位数字为刊社记者证的流水号。

三、期刊社或个人自行制作的“记者证”、“采访证”一律无效。严禁伪造、变造、转让、抵押、出卖和冒名使用记者证,违者由我局会同有关部门严肃处理;触犯刑律的,移交司法部门依法追究刑事责任。

四、新记者证启用之日,旧记者证同时作废。

四川省新闻出版局
1998年8月14日