

# 云南松侧根对浅层土体的水平牵引效应的初步研究

周 跃 陈晓平

李玉辉 骆华松 徐 强

(云南省地理研究所, 昆明 650223)

(云南教育学院地理系, 昆明 650223)

**摘 要** 植物的侧根对周围土壤具有机械牵引作用。一般来讲, 垂直根可以通过增加根际土层的抗剪强度来加固土体, 斜向侧根则能够在对周围土体进行牵引固持的过程中, 通过提高土体的水平抗张强度实现对土体的增强加固, 这一作用即侧根的水平牵引效应。为了检验高山峡谷区云南松林是否也有这种效应, 并调查其量值, 我们在金沙江中上游的虎跳峡地区对云南松根际土层进行了直接剪土测试。结果表明, 在表层土体中(0~20cm)松树侧根能在1000cm<sup>2</sup>的垂直横截面上提供421.19~561.05N的水平牵引力, 使土层的抗滑力提高33.2%~37.58%。受该牵引力的影响, 侧根把根际土层的抗张强度提高了4.2~5.6kPa。测试结果预示, 只要云南松垂直根可以把浅层土体锚固到较深层稳定的土体上, 通过水平牵引效应, 云南松侧根可在一定程度上与垂直根共同克服林地浅层坡面的不稳定性, 如浅层滑动和蠕移。

**关键词** 云南松侧根 土壤侵蚀控制 水平牵引效应 野外直测

## PRELIMINARY STUDY OF TRACTIVE EFFECT OF LATERAL ROOTS OF *PINUS YUNNANENSIS* ON SHALLOW SOIL MASS

ZHOU Yue and CHEN Xiao-Ping

(Yunnan Institute of Geography, 20 Xuefu Road, Kunming 650223)

LI Yu-Hui LUO Hua-Song and XU Qiang

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

**Abstract** Lateral roots of plants are provided with mechanical stabilizing effect on the rooted soil, through their tractive effect. In contrast to the effect of vertically-extending roots, the traction effect reinforced the soil by enhancing the tensile strength of the rooted soil zone. To verify whether or not a tractive effect exists in the roots system of Yunnan pine forest (*Pinus yunnanensis*) in the Hutiaoxia Gorge, SW China, a direct *in situ* test was conducted at two sites in the gorge. The results show that, in the topmost soil (0~20cm), the lateral roots are able to provide a tractive force of up to 421.19~561.05N over a vertical cross-section area of 20cm×50cm, or an increase in the pulling resistance of the rooted soil by 33.2~36.8%. This is equivalent to a

本文于1997-08-18收稿, 1998-03-23收到修改稿。

本研究受国家自然科学基金(编号49201003和49871054)、云南省应用基础研究基金(编号92D080和98D007M)、云南省科委主任基金(编号97D006R)和中国留学回国人员科研启动基金资助。

英国赫尔大学地理学院前院长 D. Watts 教授亲自指导了研究工作, 美国俄亥俄州立大学的 T. Wu 教授、英国曼切斯特大学的 R. Ennos 博士等给予很大帮助。云南省地理研究所、英国赫尔大学和昆明理工大学提供了很多方便。

tensile strength increase of the shallow rooted soil by 4.2~5.6kPa. The results imply that, together with the pine's vertical roots, the lateral roots of the pine trees, through their traction effect, are able to mitigate against shallow instability in the forested slopes, such as shallow slide and creep, at a certain degree.

**Key words** Lateral roots of Yunnan pine, Soil erosion control, Horizontal tractive effect, Direct *in situ* test

植物的侧根对周围土体的机械牵引作用是植物根系加固土壤的一种途径(Coppin & Richards, 1990; Zhou *et al.*, 1997)。水平牵引效应指植物侧向伸延的根系,通常在浅层,以侧根牵引力的形式提高根际土层水平抗张强度从而提高土体抗滑力,它与 Sidle(1991)提出的斜向增强作用相似。这里的根际土层可以理解为一个连续的抗张强度增强的根土复合层。侧根的水平牵引效应不同于垂直根的机械锚固效应;后者是通过提高根际土层在剪切面上的抗剪强度而起加固土体的作用。如果把垂直根的效应看成是抗剪强度的增强作用,我们可以把侧根的水平牵引效应理解为抗张强度的增强作用。水平牵引效应的量值取决于土壤强度和侧根抗张强度以及根土粘合强度(即根土界面单位面积上的粘合力)。如果侧根提供的牵引力仍不足以增强土层抵御抗滑力、土层滑动或持续蠕移,侧根则被拉断或拔出土壤。

通常情况下,土壤滑动和蠕移可能首先在坡地表面产生若干张力缝隙(湖南水力勘测设计院,1983)。在林地内,这些缝隙中从相对稳定土体延伸到潜在滑移土体中(或沿相反方向延伸)的侧根,通过本身的抗张强度和根土粘合力,具有牵制滑移和加固土体的作用(图1)。在这种情况下,侧根通过牵引效应增强了土体水平方向抗滑力,提高了抗张强度,加固了根际土层。这种作用的强度与侧根的密度呈正比。

云南松林是滇西北高山峡谷区广泛分布的一种森林植被。云南松(*Pinus yunnanensis*)根系发达,垂直主根长1.2~1.5m。在地表面下40cm土层中,侧根密集,一般占总根系生物量的60%以上(Zhou, 1997)。这些侧根顺坡伸延,相互盘绕,与土壤一起形成基本与坡面平行的根际土层。多数侧根从主根分出后向四周幅射,逐级分支,少有帚状根出现。基于这样的结构与分布特征,云南松侧根极可能具有明显的水平牵引效应,对高山峡谷陡坡侵蚀控制和坡面保护有重要意义。为了证明这个假设并进行定量分析,我们对虎跳峡地区云南松林进行了野外直接剪土实验。

## 1 研究方法

### 1.1 实验地选择

约20km长的虎跳峡位于云南西北部,金沙江西南-东北向穿峡而过。这里的地形发育

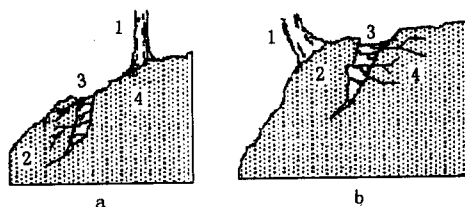


图1 浅层土体滑动与侧根的牵引效应

Fig. 1 The movement of shallow soil mass and tractive effect of lateral roots

a: 来自稳定土体的侧根的作用 Function of the lateral roots from the stable mass

b: 来自滑动土体的侧根的作用 Function of the lateral roots from the sliding mass

1: 松树 Pine tree 2: 滑动土体 Sliding soil mass 3: 侧根和张应力缝隙 Lateral roots and tensile cracks 4: 稳定土体 Stable soil mass

成 V 字形峡谷,坡面一般在 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。峡谷区多年平均降雨量为853.4mm,雨季通常在6月上旬至10月中旬<sup>1)</sup>。从两岸高峰到江面的垂直相对高差达3500m以上。由于坡陡造成的重力和水力作用强烈,坡面物质频繁地向下移动,滑坡泥石流经常发生。峡谷的东南岸有大量悬崖峭壁,相对平缓的山坡多被垦植,两岸的广大地区发育着不同程度的天然植被。云南松林是当地的主要植被类型,分布在海拔1950~2800m的坡地上,以西北岸为主,多以纯林出现。林冠覆盖度为60%~90%。林分垂直结构简单,通常只有乔木层,松树高8~12m,胸径10~20cm。林下灌木及草本植物稀疏。

在峡谷上中段,我们选择了两个实验点,即永胜点和莫喜点。永胜点在峡谷中段西北岸,海拔2480m,坡度 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ,坡向SE,土壤为暗红壤,粉壤质地,容重 $1.19\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。莫喜点位于峡谷上段东南岸,海拔2230m,坡度 $28^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,坡向NW,土壤为粗骨性红壤,砂壤质地,容重 $1.05\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。实验期间,两地在10~20cm的土层中的土壤湿度为:永胜点7.94%,莫喜点7.35%。

在两个实验点,我们分别选取了一块 $30\text{m}\times 40\text{m}$ 的林地片段,片段内的坡度、坡向、土壤条件和松林群落特征大致相同,林冠覆盖度为90%。

## 1.2 基本假设

设想一个在坡面上的土壤长方体或土墩,上顶面即为坡地表面,下底面仍与下层土壤连为一体。如果把它从四侧面切开并平行于坡面牵引土墩,该牵拉力将在土墩下底面产生一剪切力;与此同时,土墩也将由于土墩本身的抗剪强度在下底面产生一个抗剪力以抗御引入的剪切力或拉力( $F_p$ )。如果该受拉土墩有侧根穿入并与稳定土体连接,土墩将因此获得附加的抗拉力,从而使土墩能承受更高的 $F_p$ 。这个水平向抗拉力的增量在土层垂直截面上单位面积内的量值即为土墩增加了的抗张强度;该抗拉力的增加作用就是侧根的水平牵引效应。在云南松林地,可以在任何一点设想这样一个土墩,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。基于这一思想,我们开凿了两组土墩,一组有根穿过,一组无根留下(全部侧根在土墩四个侧面被切断清除),并假定这两组土墩土壤本身的性质差异可以忽略,且有根样中的侧根都以同样的方式参予牵引作用。当引入拉力时,两组试样以不同的方式、不同的量值抵御拉力。我们把这些差异看成是侧根牵引力产生的结果,把差异的量值视为对水平牵引效应量值的反映。

## 1.3 测定方法

我们用的实验装置系统主要分为4部分(图2):产生拉力的曲杆式千斤顶,使拉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。

供测试用的土墩长40cm、宽35cm、高20cm。正面(或向下坡一侧)全部切开并移走所有土壤,下底面仍完好保留。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土层中的侧根。在土墩后面沟槽中露出的侧根穿过一个面积为 $(40+5+5)\text{cm}\times 20\text{cm}$ 或 $1000\text{cm}^2$ 的垂直截面。在两侧沟槽中也有横向侧根穿入,但这些根在实验中不予考虑并被切断清除。在永胜点我们一共开凿了15个有效土墩,其中4个为对比样,它

1) 根据虎跳峡桥头水文站的资料

们四周的所有侧根全被切断清除。莫喜点开凿了12个土墩,其中3个为对比样。两个点上开凿的土样都随机分布在林地的长方形地段内。

牵拉测试中,拉力  $F_p$  尽量均匀地增加,使剪切箱的平均位移率控制在  $0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。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力的关系。

在牵拉过程中,拉力传感器将电信号传给电阻表,即可读到任一时刻的电阻值( $\epsilon, \text{k}\Omega$ )。用公式(1)、(2)和(3),可以算出加在土墩上的拉力( $F_p$ , N),土墩剪破时的侧根牵引力( $F_{Tf}$ , N)和根际土层因为侧根牵引力而在给定横截面积上增加的抗张强度( $\Delta\tau_T, \text{kPa}$ )。

$$F_p = \epsilon K \quad (1)$$

$$F_{Tf} = F_{pf} - F_{rmax} \quad (2)$$

$$\Delta\tau_T = F_{Tf}/A_b \quad (3)$$

式中的  $K$  是电阻-拉力转换系数,在实验室标定为  $0.324\text{kg}\cdot\text{k}\Omega^{-1}$  或  $3.18\text{N}\cdot\text{k}\Omega^{-1}$ ,  $F_{pf}$  是  $F_p$  在土墩被剪破时的最大拉力,  $F_{rmax}$  是土墩由于土壤本身的抗剪强度而产生的最大抗拉力,  $A_b$  为给定垂直横截面积 ( $A_b = 1000\text{cm}^2$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 测试观测

牵拉初期,在剪切箱传来的水平力的挤压下,受测土墩并无明显移动,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  $F_p$  在剪破后并不迅速降低,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。这种受力变化在永生点和莫喜点都有表现而且情况相似。

### 2.2 拉力与位移及其相互关系

一般来讲,有根样在临界位移时的拉力 ( $F_{pf}$ ) 的量值比无根样的高,表明它们有较高的抗拉力。永胜点11个有根样中,  $F_{pf}$  的平均值为  $1488.33\text{N}$  (表1)。4个无根样的  $F_{pf}$  平均

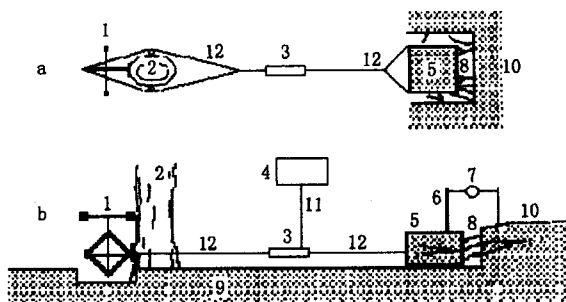


图2 野外直剪测试的装置系统示意图

Fig. 2 Instrument system used for tractive effect test in situ

a: 顶视图 Vertical view b: 侧视图 Side view

- 1: 曲杆式千斤顶 Pull jack 2: 树干 Tree trunk 3: 拉力传感器 Load cell 4: 电阻表 Resistance meter 5: 剪切箱 Shearing box  
6: 位移杆 Displacement pole 7: 位移表 Displacement meter  
8: 出露在沟槽中的侧根 Roots in dug trench 9: 浅层土壤 Shallow soil layer 10: 稳定土体 Stable soil mass 11: 导线 Conducting wire 12: 钢索 Steel cable

911.10N。有根样的临界位移平均达到5.0mm,无根样的只有2.5mm,说明前者能承受较高的临界位移。

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。图3a、b 分别给出了11个有根样和4个无根样  $F_p$ - $X_d$  关系的散点图和回归曲线。两条回归曲线可用于粗略估计在任一  $X_d$  时的  $F_p$ 。从图3b 可看出,尽管两者在达到极高点后都回落,有根组的曲线高居于无根组之上,表明前者  $F_p$  值高于后者。两曲线间的点区代表产生的侧根牵引力( $F_T, N$ )。

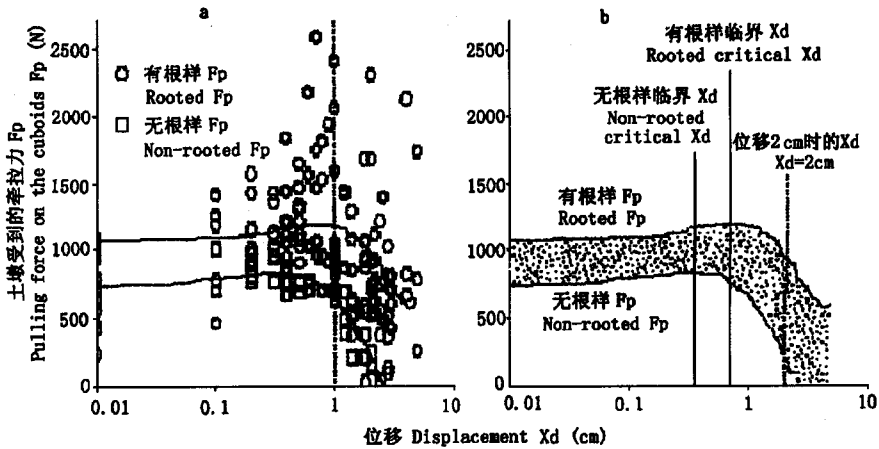


图3 永胜点受测土壤的拉力与位移的关系

Fig. 3 Relationship between pulling-force and displacement of the tested soil cuboid at Yongsheng

a: 11个有根样和4个无根样的测试结果散点图 Scattergram of test results of the 11 rooted and the 4 non-rooted cuboids b: 两组试样拉力-位移回归曲线 The two regression curves of  $F_p$ - $X_d$  of the two sample groups

表1和图3表明,云南松侧根提高了受测土壤对  $F_p$  的抵抗力,有根组较高的  $F_p$  说明施加到土壤上的拉力已产生侧根牵引力,使土壤因此获得附加抗拉力。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。

莫喜点有根样的  $F_{pf}$  平均为1268.47N(表1),无根样的  $F_{pf}$  平均847.29N。有根样与无根样的平均临界位移分别是4.3mm和2.6mm。相比较,莫喜有根样的  $F_{pf}$  和临界位移较永胜低;无根样的  $F_{pf}$  也较低,但其临界位移有微小增加。对12个受测样的结果进行回归分析,有根样和无根样的  $F_p$ - $X_d$  关系与永胜的(图3)大致相似,但两回归曲线间的点面积有所减小。

### 2.1.3 侧根牵引力分析

在林地内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。在永胜点,我们可以把4个无根样的最大抗拉力  $F_{pf}$  的平均值视为该地段土壤本身的 最大抗拉力  $F_{rmax}$  的近似值,用无根组的  $F_{pf}$  代替纯土壤的  $F_{rmax}$ 。实验结果表明,无根样的平均  $F_{pf}$  为911.1N(表1),该值即为  $F_{rmax}$  的替代值。表1表明,几乎所有有根土壤的  $F_{pf}$  均高于911.1N,用公式(2)可得出,在临界位移时侧根的牵引力( $F_{rf}, N$ )平均为577.23N。受  $F_{rf}$  的影响,有根组的平均抗拉力增加了38.78%。

如表1所示,永胜点有较高侧根生物量( $M_r, g$ )的土壤一般都测得较高的侧根牵引力

表 1 永胜点和莫喜点受测土壤的拉力、侧根牵引力及侧根生物量

Table 1 The pulling force, lateral root's traction force and lateral-root's biomass of the tested soil cuboids at Yongsheng and Erdui

	有根土壤样 Routed soil cuboids															无根土壤样 Non-rooted soil cuboids			
	C1	C2	C3	C4	C5	C7	C10	C11	C12	C14	C15	平均 Mean			C6	C8	C9	C13	平均 Mean
永胜点 Yongsheng																			
Ep <sub>f</sub> (N)	1436.16	1131.13	2605.42	1864.03	1369.43	2068.45	905.54	1159.73	1528.30	1169.26	1134.31	1488.33			1019.93	899.19	772.09	953.20	911.10
临界 X <sub>d</sub> Critical X <sub>d</sub> (mm)	3	3	7	4	3	10	7	3	8	4	3	5.00			3	2	2	3	2.5
F <sub>Trf</sub> (N)	525.06	220.09	1694.32	952.93	458.33	1157.35	-5.56	248.63	617.20	258.16	223.21	577.23							
增加的 F <sub>pf</sub> Increased F <sub>pf</sub> (%)	36.56	19.45	65.03	51.12	33.47	55.95	-0.61	21.44	40.38	22.08	19.68	38.78							
Δ <sub>Tr</sub> (kPa)	5.25	2.20	16.94	9.53	4.58	11.57	-0.056	2.48	6.17	2.58	2.23	5.77							
根生物量 Root biomass(g)	279	121	342	330	342	345	178	202	233	138	197	246.09							
莫喜点 Erdui	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9						M10	M11	M12		
F <sub>pf</sub> (N)	1185.13	902.40	832.48	1601.42	1429.80	1366.26	1528.26	784.82	1785.68			1268.47			803.85	991.35	746.67		847.29
临界 X <sub>d</sub> Critical X <sub>d</sub> (mm)	5	3	2	6	4	4	4	3	8			4.33			3	3	2		2.67
F <sub>Trf</sub> (N)	337.84	55.11	-14.81	754.13	582.51	518.96	680.97	-62.47	938.39			421.18							
增加的 F <sub>pf</sub> Increased F <sub>pf</sub> (%)	28.51	6.11	1.51	47.09	40.74	37.98	44.56	-7.96	52.55			33.20							
Δ <sub>Tr</sub> (kPa)	3.37	0.55	-0.14	7.54	5.83	5.19	6.81	-0.63	9.38			4.21							
根生物量 Root biomass(g)	161	196	132	337	188	276	226	145	248			212.11							

F<sub>pf</sub>: 土壤被剪破时的拉力 Pulling force of failure of the cuboids F<sub>Trf</sub>: 土壤被剪破时的侧根牵引力 Root traction resistance of failure Δ<sub>Tr</sub>: 侧根土层增加平向抗张力强度 Increased tensile strength of the rooted soil layer 侧根生物量以鲜重表示 Lateral-root's biomass is presented as fresh weight

$F_T$ 。统计分析表明,  $F_T$  与  $M_r$  呈正相关关系, 两者的线性回归关系为:

$$F_T = 4.43M_r - 472.56 \quad (R = 0.69, n = 11) \quad (4a)$$

$$\text{或 } F_T = 4.43(M_r - 106.5) \quad (4b)$$

莫喜点无根样在临界位移时的拉力( $F_{pf}$ )或土壤的最大抗拉力( $F_{rmax}$ )为847.29N(表1)。由公式(2)得出, 侧根牵引力( $F_T$ )平均为421.18N; 该  $F_T$  使有根土墩的抗拉力提高了33.20%。与永胜点一样, 有根样的  $F_T$  也随侧根生物量的增加而增加, 它们的关系更为密切:

$$F_T = 4.04M_r - 436.21 \quad (R = 0.75, n = 9) \quad (5a)$$

$$\text{或 } F_T = 4.04(M_r - 107.9) \quad (5b)$$

线性方程(4a)和(5a)的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增加的抗拉力。其数值大小对于确定云南松护坡作用潜力具有重要理论意义。 $a_T$  在(4a)、(5a)式中差异不大, 表明它们表征云南松的护坡潜力有较高可靠性。公式(4a)、(5a)可表示为:  $F_T = a_T(M_r - C_r)$ , 其中  $C_r$  表征了一定土体内侧根要发挥牵引效应必需具备的最小根量。 $C_r$  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结作用方式有关。据研究, 云南松侧根的抗拉强度较低; 松根的根土粘结作用有强弱不等的3种形式: 毛细粘结作用, 多见于细根(直径 $<0.3\text{cm}$ )和根梢, 粘结强度较低; 摩擦粘结, 多见于粗根(直径 $>0.3\text{cm}$ ), 粘结强度较高; 剪切粘结作用(Zhou, 1997; Zhou, *et al.*, 1997)。根据野外观察, 根量低的土墩多为细根而且不能承受较大拉力, 粘结作用为前者, 它们因此没有明显的牵引作用; 根量大的土墩多有粗根穿入, 它们能承受较大的拉力而且粘结作用多为后两者, 能发挥明显的牵引作用。

#### 2.1.4 抗张强度的增加量

用公式(3)可以计算出云南松侧根牵引力对根际土层抗张强度的增加量( $\Delta\tau_T$ )。如表1所示, 在两个实验点给定的横截面上( $1000\text{cm}^2$ )侧根都增加了根际土层的抗张强度: 永胜点的增加量平均为5.77kPa, 莫喜点平均4.21kPa。

### 3 讨论与结语

Gray & Leiser(1982)曾用复合材料中基质(土墩)和纤维(侧根)相互作用的机制来解释垂直根的土壤加强作用。他们认为土层中的滑动应力导致了根内的张力, 后者反过来使土层具有更高的强度。这种解释也适于水平牵引效应, 但其力学过程的阐述还应再详细。在我们的实验中, 松树侧根一端嵌合在土墩里, 另一端也锚固在稳定土体中, 从而使根-土形成一个连续体, 在一定的应力引入后会有一定的力系产生。本研究认为, 水平牵引效应包含了3种机械作用过程: 1)当滑动发生时(在我们的测试中相当于开始牵拉剪切箱时), 滑动力在某一受力点牵动侧根并使其产生根内张力; 2)这些侧根以自身张力的形式顺根延伸方向把滑动力(在测试中相当于牵拉力  $F_p$ )的一部分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), 并且引起了该点土体对该力( $F_p$ 的一部分)的阻力; 3)同时, 这些侧根又把产生的阻力以根内张力的形式传递到滑力最早作用的地点(即受拉土墩)并参与抗御滑动力( $F_p$ )。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力  $F_T$ ;  $F_T$  越高,被抵消的  $F_p$  越多。仅当拉力足够高而且  $F_T$  抵消后剩下的  $F_p$  仍高于纯土的最大剪切力 ( $F_{rmax}$ ) 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(图3)。

云南松的侧根具有一定的抗张强度,与浅层土壤共同形成了一个根际土层。通过牵引效应,这些侧根提高了根际土层的水平抗张强度。野外观察发现,在松林地段云南松的主根穿过上层土壤,把该根际土层锚固到较深层和较稳固的土体上。在这个锚固作用的参与下,云南松侧根在一定程度上具有克服浅层甚至深层不稳定性(例如浅层滑坡和土壤蠕移)的潜能。虎跳峡地区频繁的浅层侵蚀是峡谷坡面不稳定的主要原因,因此本地区云南松的水平牵引效应对控制侵蚀、保护坡面有重要意义。

水平方向和垂直方向土壤加固 (Soil reinforcement) 是乔木根系对根际土层行使的两种机械固持作用 (Zhou *et al.*, 1997); 前者是抗张强度的增强,后者为抗剪强度的增强。在通常情况下,两者通过各自的力学机制共同起到加固土层的作用;它们各自的作用强度随侧根与垂直根的根量、分布而变化。在过去20年中,国内外对垂直根的机械增强作用已有不少研究和实验结果 (Ziemer & Swanston, 1977; Wu & Swanston, 1980; Morgan & Richson, 1995; 谢明曙, 1990), 但对侧根的水平增强作用却认识较少,不但没有进行过任何形式的测试,而且对这种作用的力学机制也没有作过专门分析 (Coppin & Richards, 1990)。本研究在国内外最早对植物侧根对土体抗张强度的机械增强作用(即水平牵引效应)进行了定性定量分析,首次提出并证实了高山峡谷区云南松林的水平牵引效应,并且给出了它的量值。该研究成果为植物根系机械固土作用的研究提供了思路和技术手段。

## 参 考 文 献

- Coppin N. J. & I. G. Richards. 1990. Use of vegetation in civil engineering. CIRIA. London; Butterworths.
- Gray D. H. & A. J. Leiser. 1982. Biotechnical slope protection and erosion control. New York; Van Nostrand Reinhold.
- Hunan Institute of Water Conservancy (湖南水利勘测设计院). 1983. Engineering geology on side slopes. Beijing; Water Conservancy Press.
- Morgan R. P. C. & R. J. Richson. 1995. Slope stabilization and erosion control—a bioengineering approach. London; E & EN Spon.
- Sidle R. C. 1991. A conceptual model of changes in root cohesion in response to vegetation management. *Journal of Environment Quality*, 20: 43~52.
- Wu T. H. & D. N. Swanston. 1980. Risk of landslides in shallow soils and its relation to clearcutting in southeastern Alaska. *Forest Science*, 16: 495~510.
- Xie M. S. (谢明曙). 1990. Effective range and the best structure of slope-stabilizing strength of trees and shrubs root systems. *Water and Soil Conservation (水土保持学报)*, 4(1): 17~24. (in Chinese)
- Ziemer R. R. & D. N. Swanston. 1977. Root strength changes after logging in Southeast Alaska. USDA Forest Service Research Note, PNW-306. 1~7.
- Zhou Y. 1997. Effects of the Yunnan pine (*Pinus yunnanensis* French) forest on soil erosion control and soil reinforcement in the Hutiaoxia Gorge, Southwest China. Ph. D. thesis, the University of Hull. Hull, UK.
- Zhou Y., D. Watts, X. P. Chen, Y. H. Li, H. S. Luo & Q. Xiu. 1997. The traction effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on soil reinforcement: a direct *in situ* test. *Plant and Soil*, 190: 77~86.