

文章编号: 1008-2786-(2016)6-757-06

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000183

红粘土土质边坡乔木根-土复合体剪切试验

刘惠江¹ 李光范² 胡伟² 文伟²

(1. 海口经济学院 建筑工程学院 海南海口 571129; 2. 海南大学 土木建筑工程学院 海南海口 570228)

摘 要: 为研究雨林乔木类树种的根系存在对红粘土土质边坡的加固效果,并从根系形态、几何特征方面研究其加固机理,选取海南热带雨林地区常见的四类直根系乔木树种进行现场大型剪切试验和根系实地统计,获取不同深度下根-土复合体的剪应力与位移关系曲线,并取相应的原状土进行室内直剪试验,将现场剪切试验条件下测得的根-土复合体抗剪强度与室内素土抗剪强度进行对比,计算出不同根-土复合体土体抗剪强度增长率,最终得出在现场原位条件下,四类树种根系中小叶榄仁根-土复合体抗剪强度的增长率最大,其次是重阳木根系和凤凰木根系,非洲楝根系最差;对于四类树种来说都存在一个最优根土面积比,使得根系能最大限度地发挥自身提高土体抗剪强度的作用。

关键词: 乔木根系; 现场剪切试验; 根系阻滑; 原位根-土复合体

中图分类号: S157

文献标志码: A

植被护坡是近些年形成的一门新学科,是一种利用植被涵水固土的原理稳定岩土边坡的浅表层,同时恢复坡面生态环境的新技术。目前国内外对植被系统对边坡土体的阻滑效应的研究主要以表层草本类植被根系^[2-9]为主,由于根系直径、长度、生长范围较大,获取难度相应增大,相应的试验仪器和规范也较少,因此相对于草本类植被根系,乔木类植被根系在相关的根-红粘土复合体抗剪强度性能研究较少,且国内的研究多集中于北方乔木树种,对南方乔木树种少有涉及。本文从海南热带雨林树种中选取常见的四类直根系乔木树种,并对四类树种的现场原位根-土复合体的剪切性能与根系几何形态特征进行综合分析,对比不同直根系乔木树种根-土复合体样方抗剪强度增长比值、并研究不同深度下根土面积比对根-土复合体剪切性能的影响,初步

探索直根系乔木树种的固土阻滑效应。

1 试验区概况

海南地形以山地、丘陵为主,覆盖在山地地表上的土体多为由花岗岩和玄武岩经过红土化而成的红粘土,这种红粘土有相对于其他粘土而言较特殊的缩胀性,在湿热交替气候作用下,土体会发生缩胀现象,产生裂缝。在地形相对突起或植被比较稀少的地面处,地裂缝发育也比较明显,且分布集中。地裂缝的存在不仅会破坏土体的整体性,增加土体的渗透能力,还会降低边坡稳定性。试验区位于海南中北部,是典型的海南红粘土山地地形。炎热多雨的气候,有利于热带雨林乔木树种的培育。

收稿日期(Received date): 2015-12-11; 改回日期(Accepted): 2016-06-02。

基金项目(Foundation item): 海南省社会发展科技专项项目(SF201456); “十二五”科技支撑计划项目(2013BAK05B03); 海南省科协青年科技英才创新计划项目(201506) [Hainan Social Development of Science and Technology Special Projects(SF201456); The Twelfth five Year Science and Technology Support Plan(2013BAK05B03); Hainan Technology Association Young Talents Innovation Projects(201506)]

作者简介(Biography): 刘惠江(1992-),女,硕士,主要研究方向: 边坡工程 [Liu Huijiang(1992-),Female,M.Sc.,major research direction: slope engineering] E-mail: liuhuijiang1778@sina.com

* 通信作者(Corresponding author): 李光范(1959-),男,教授,博士,主要研究方向: 岩土工程及防灾减灾工程 [Li Guangfan(1959-),Male,Professor,Ph.D.,major research direction: geotechnical engineering and disaster prevention and mitigation engineering] E-mail: lgl728@163.com

2 试验方案

2.1 试验树种选择

直根系乔木树种的根系中不仅有可发挥加筋作用的侧根,还有须根系乔木和其他草本植物不具备的可发挥锚固作用的主根。除此之外,考虑到研究区域内的台风天气多发,所选的研究树种还应具有较好的抗风性能。综合以上两个因素,本文选取海南地区常见的小叶榄仁(*Terminalia Mantaly*)、凤凰木(*Flamboyanttree*)、非洲楝(*Khaya Senegalensis*)、重阳木(*Chinese Bischoewood*)四类直根系乔木进行试验研究,这四类树种是海南地区直根系乔木的典型代表树种,并都具有良好的抗风强度、生长速度和环境适应性,对植被治理的推广提供了可行性。

2.2 试验装置

为了进行原位根-土复合体的现场剪切试验,结合所选取的乔木树种根系生长发育规律、根系一般形态确定现场大型根-土复合体样方尺寸为 $100\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高),然后根据该样方尺寸,结合 Norris、毛妍婷^[10]等人设置的剪切盒尺寸 $150\text{ cm} \times 150\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高),自行设计和制作一套现场原位根-土复合体剪切试验装置,主要由加载系统(千斤顶、钢垫板)和监测系统(压力传感器、位移传感器等)组成,装置中的加载系统如图1所示:两块钢垫板包括加载钢垫板和反力钢垫板,其中,反力钢垫板主要作用是千斤顶提供反力基础,而加载钢垫板的作用是将千斤顶提供的剪切力传递到剪切面上(图2)。



图1 现场试验试样及试验装置图

Fig.1 The sample and test device of field shear test

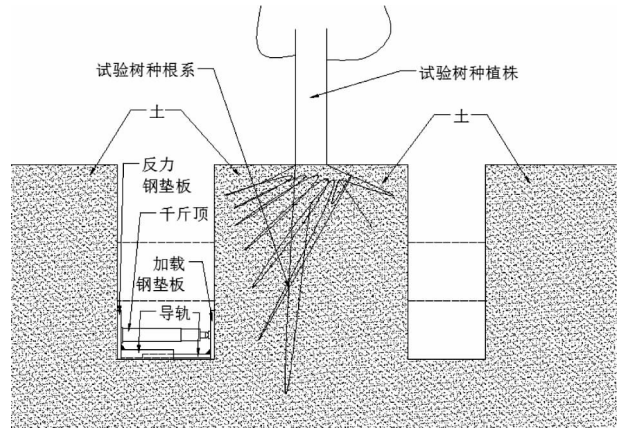


图2 大型根-土复合体现场剪切试验原理示意图

Fig.2 The generalized section of field experiment

2.3 试验土样

现场试验地点为海南省定安县金光林场。选择小叶榄仁、凤凰木、重阳木、非洲楝四类3~4 a生树种,四类树种的生长指标如表1所示。每个树种预选2个土样样方,共计8个土样样方。每个样方先进行40 cm深度的开挖、该深度的剪切试验完成之后进行继续进行70 cm、1 m深度的开挖,样方大小分别为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 40\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高)、 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 70\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高)和 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。其中,相同树种的两个土样样方中,其中一个为标准样方,另一个为平行样方,当两个样方试验结果相差较大时,需重新选取相应的标准样方和平行样方进行试验。

3 试验步骤

试验步骤:1. 试验样本开挖:在选定的植株四周约70 cm外,先取土层深度1 m的原状土样,再根据要制备的试样尺寸在植株四边开挖深度为40 cm的土槽,其中一边槽宽为70 cm,作为试验加载装置的安放槽,另外的三个边槽仅需开挖至50 cm宽度。在40 cm深度的根-土复合体土样剪切试验结束后,先将试验装置从安放槽内移至槽外,确认试验装置都已搬离后,从槽底40 cm处继续往下开挖,直至形成深度为70 cm的土样,重复上述40 cm深度土样的步骤,试验结束后,重复搬离装置步骤,从原先的70 cm深度槽底处继续往下开挖至1 m深度,重复上述试验步骤。

2. 试验装置安放:在试样的正面分别依次安装钢板、及施加推力的千斤顶、压力传感器和钢板,并

表 1 四类树种生长指标

Tab. 1 Growth index of 4 arbor species

乔木生长指标	凤凰木		小叶榄仁		重阳木		非洲楝	
	编号 1	编号 2	编号 1	编号 2	编号 1	编号 2	编号 1	编号 2
树高(m)	7.4	8.1	7.9	8.4	7.8	8.5	6.4	6.9
树根最大深度(cm)	145	132	180	192	105	124	89	91
主根与侧根夹角范围	< 45°		30° ~ 90°		< 45°		45° ~ 90°	

在试样的四个临空面底部分别放置土体位移传感器^[11], 试样及试验装置如图 1 所示:

3. 试验加载: 待试验装置安装完毕后, 开始摇动千斤顶, 分级施加水平推力, 控制加荷速率使变形速率控在每 15 ~ 20 s 内的水平位移在 2 mm 左右。试验在千斤顶测力计出现峰值时停止。对试样破坏情况进行记录并拍照。

4. 不同样方根系形态记录统计: 用铁锹、铁铲等工具清除试样侧面土体, 使根系尽可能的裸露出来, 对剪切面的根系进行数量和直径的统计记录, 进行不同深度根土面积比的计算, 并对不同树种根系的形态进行拍照和绘制记录, 并对不同树种根-土复合体取原状土样, 进行室内直剪试验, 获取素土土样的抗剪强度, 结合相应的根-土复合体抗剪强度得出根-土复合体样方抗剪强度增长比值。

4 试验结果分析

4.1 现场原位根-土复合体抗剪强度分析

深度为 40 cm、70 cm、1 m 的四类树种根-土复

合体试样剪切力与剪切位移关系如图 2 ~ 5。

从图 3 ~ 6 显示, 四类树种现场根-土复合体剪切力与位移曲线都存在着线性部分和非线性部分, 线性部分按斜率大小可分为不同的线段, 且随着剪切荷载达到一个极值的时候, 土样达到剪切破坏, 但在这一状态下随着剪切位移的进一步加深, 根-土复合体土样的剪应力仍能保持在一个比较稳定的范围内, 这表明含根土体达到最大抗剪强度时, 理论上我们认为土样已经被剪切破坏, 但此时的根-土复合体仍具有一定的抗剪强度, 且根据试验结束后对土样根系的挖掘, 发现根系并未发生破坏, 这表明根系在含根土体破坏之后, 仍能对土体的产生一定的固持作用。各类曲线虽然形状各异, 但都呈现出土样剪应力的最大极值与土样深度正相关的关系。

四类乔木树种根-土复合体抗剪强度对应相应素土土样抗剪强度的增长比值如表 2 所示, 现场自然状态下生长的小叶榄仁整体根系对土体抗剪强度增长率的影响最大的, 其次是重阳木整体根系和凤凰木整体根系, 非洲楝整体根系最差。

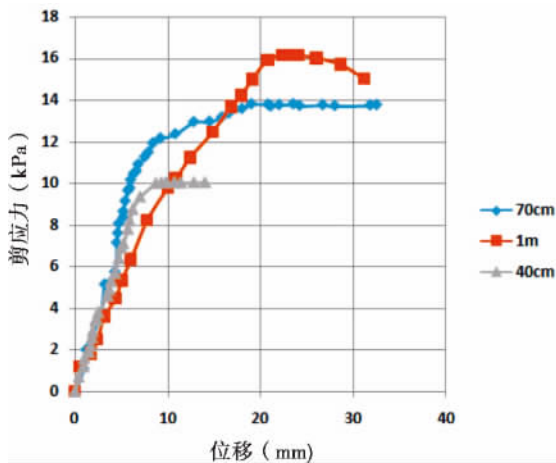


图 3 非洲楝根-土复合体剪应力-位移关系曲线

Fig. 3 Relation of shear stress and displacement of *Khaya Senegalensis* root-soil composites

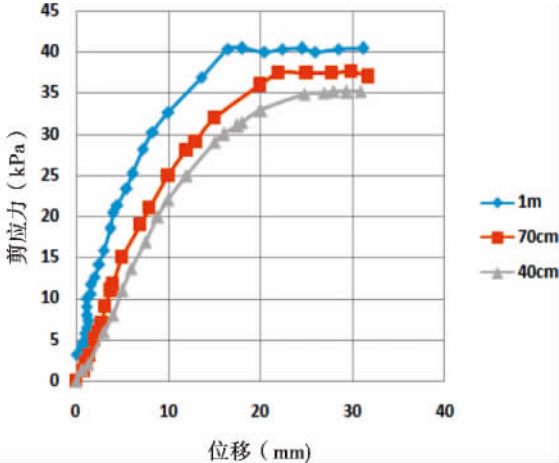


图 4 凤凰木根-土复合体剪应力-位移关系曲线

Fig. 4 Relation of shear stress and displacement of *Flamboyant tree* root-soil composites

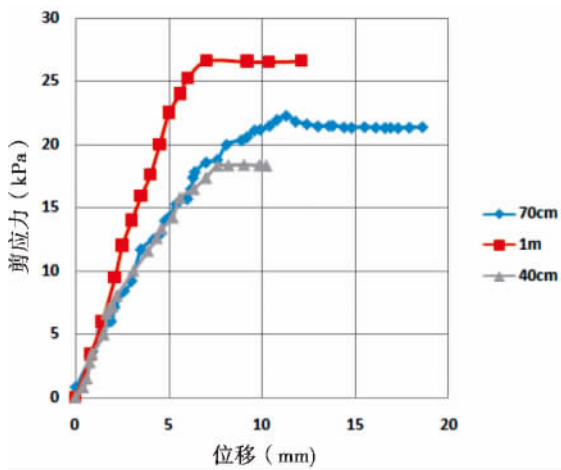


图5 小叶榄仁根-土复合体剪应力-位移关系曲线
Fig.5 Relation of shear stress and displacement
of Terminalia Mantaly root-soil composites

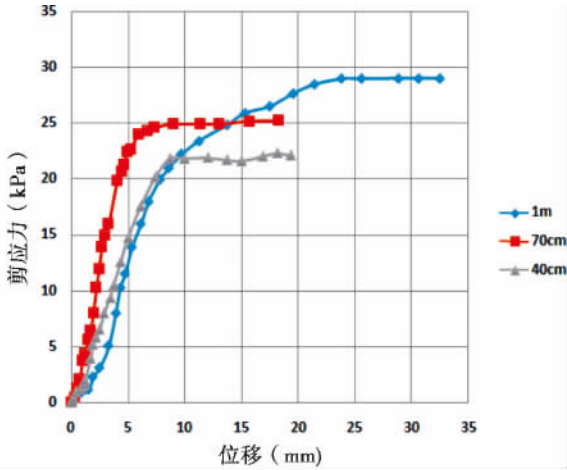


图6 重阳木根-土复合体剪应力-位移关系曲线
Fig.6 Relation of shear stress and displacement
of Chinese Bischofwood composites

表2 四类树种根-土复合体样方抗剪强度增长比值
Tab.2 Growth ratio of shear strength of 4 arbor species
root-soil composites

树种	小叶榄仁	非洲楝	凤凰木	重阳木
样方1 抗剪强度增长比值(%)	33.4	13.8	14.0	30.2
样方2 抗剪强度增长比值(%)	35.7	14.6	16.3	31.0

4.2 根系几何特征分析

四类树种的根系形态如图7所示,非洲楝、凤凰木、小叶榄仁、重阳木四类树种在不同剪切面深度的根土面积比见表3。

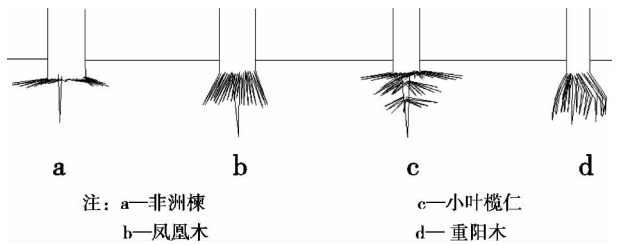


图7 四类不同树种的根系形态图
Fig.7 Root morphology of 4 arbor species

表3 四类树种不同深度的根土面积比(%)

Tab.3 Ratio of cross sectional area of root and soil(%)

样方深度	非洲楝	凤凰木	小叶榄仁	重阳木
40 cm	2.72	3.94	4.79	4.03
70 cm	1.57	3.41	4.74	3.95
1 m	0	2.16	3.97	3.55

从不同深度的根土面积比、树种根系形态与试验所得结果发现:由非洲楝树种根系主根深度仅有89 cm,并未贯穿深度为1 m的根-土复合体样方,而在剪切深度为40 cm与70 cm的非洲楝根-土复合体样方中,都存在着贯穿剪切面的主根,可知对于直根系乔木树种根-土复合体,根系特别是扎根深度最深的主根的存在有助于抗剪强度的提高。由于非洲楝根系的整体形态呈完全开启的伞骨状,侧根只有一层,与垂直面之间的夹角 $>45^{\circ}$ 且接近 90° ,使得侧根基本分布在40 cm深度左右的土壤里,而70 cm深处的土壤里几乎没有侧根的存在,仅有主根达到该深度,因此非洲楝根系40 cm深度处的根土面积比远 >70 cm深度的根土面积比,而在整个剪切过程中,非洲楝根-土复合体在40 cm剪切深度处的抗剪强度小于其在70 cm剪切深度处的抗剪强度,可知非洲楝根系的根土复合体抗剪强度并未随着根土面积比的增大而相应增大。

凤凰木树种的根系整体呈未开启的伞骨状,侧根仅有一层,与垂直面之间的夹角 $<45^{\circ}$,主根深度达1.45 m,贯穿40 cm、70 cm和1 m深度的三个剪切面。三个剪切面上均有主根贯穿,但由于侧根的生长深度有限,随着深度的增加,凤凰木根系的根土面积比逐渐减小,结合不同剪切深度处的根土面积比与根-土复合体抗剪强度,可看出凤凰木的根-土复合体抗剪强度与根土面积比存在正相关关系。

对比小叶榄仁根系40 cm、70 cm与1 m深度处的根土面积比,可知由于小叶榄仁树种的根系整体呈多层伞状,侧根分为多层,在40 cm与70 cm的深

度处根系的根土面积比相差不大,但在1 m深度土体处根系的根土面积比较前两者有明显降低。

由于重阳木树种的根系整体呈爪状,侧根与主根的扎根深度相差不大,且侧根与垂直面之间的角度 $<45^\circ$ 。这种独特的根系形态,使得重阳木根系的根土面积比在深度方向上的变化相对于其他三类树种较小,在剪切位移为8 mm之内,且根土面积比处于0.395~0.403时,其根-土复合体抗剪强度随着根土面积比的增大而增大;当根土面积比处于0.355~0.395时,其根-土复合体抗剪强度随着根土面积比的增大而减小。

综上,可得出并非根系的根土面积比越大越有利于提高土体的抗剪强度,而是存在一个最优根土面积比,使得根系提高土体抗剪强度的作用能够充分发挥。四类根系在三个特定深度上的根土面积比均值由大至小排列为:小叶榄仁>重阳木>凤凰木>非洲楝,而相邻深度之间下降幅度由大至小排列为:非洲楝>凤凰木>重阳木>小叶榄仁。结合表3中四类树种根-土复合体样方抗剪强度增长比值,得出在四类树种中,根土面积比均值最大且随深度下降幅度最小的小叶榄仁对提高土体抗剪强度程度最大,根土面积比均值与树根对土体抗剪强度的影响呈正相关,而与其随深度的下降趋势之间是负相关关系。

5 结论

通过对非洲楝、凤凰木、小叶榄仁和重阳木四类热带雨林直根系乔木树种进行树种现场原位根-土复合体剪切试验、树种根系形态研究以及根系统计,并根据得出的根-土复合体抗剪强度与剪切位移关系曲线与根系形态、根土面积比进行结合分析,得出如下结论:

1. 现场原位剪切试验条件下,四类树种根-土复合体的抗剪强度都呈现同一变化规律,即抗剪强度在深度方向上会逐渐增大;

2. 虽同为热带雨林直根系乔木树种,根系形态仍会有较大差异。树种的根系形态会影响研究深度处的根土面积比,进而影响根系对土体抗剪强度的提高。

3. 四类树种对土体的抗剪强度均有提高作用,都可作为边坡治理可选树种。相同条件下,小叶榄仁和重阳木根系对土体的抗剪性能的提高最明显,对

于边坡的稳定作用更好,而相同条件下的非洲楝根系和凤凰木根系对土体抗剪性能提高程度较小,对边坡的稳定作用不明显;

4. 并非根系的根土面积比越大越有利于提高土体的抗剪强度,而是存在一个最优根土面积比,使得根系提高土体抗剪强度的作用能够充分发挥;

对根系固定土壤做出定量计算的研究是一个非常复杂的工作,需要做大量不同植物根系和不同土壤质地的试验,以此结果去量化植物根系故土效果,完善根系固定土壤的强度模型。从根系结构与分布情况分析不同根系对土壤固定的效果,也是今后要研究的重要方向。

参考文献(References)

- [1] 张永兴. 边坡工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. [ZHANG Yongxing. Slope geological engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.]
- [2] 张永亮. 沙棘根系生物力学特性研究[D]. 内蒙古农业大学, 2011. [ZHANG Yongliang. Research on biomechanical characteristic of sea-buckthorn [D]. Inner Mongolia Agricultural University, 2011.]
- [3] 陈丽华. 林木根系固土力学机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008, 3. [CHEN Lihua. The mechanisms of soil-reinforcement by roots system [M]. Beijing: Science Press, 2008, 3.]
- [4] 封金财, 王建华. 植物根的存在对边坡稳定性的作用[J]. 华东交通大学学报, 2003, 05: 42-45 [FENG Jincai, WANG Jianhua. The stability of slope with plant root [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2003, 05: 42-45]
- [5] 陈学平. 湖北沪蓉西高速公路护坡植被重建研究[D]. 北京林业大学, 2009. [CHEN Xueping. The research on revegetation in Highway of West Hubei, Hubei [D]. Beijing Forestry University, 2009.]
- [6] 刘国彬, 蒋定生, 朱显谟. 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, 03: 21-28 [LIU Guobin, JIANG Dingsheng, ZHU Xianmo. Research on biomechanical characteristic of grass roots in loess area [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1996, 03: 21-28]
- [7] Lin Zhao, Hong Hu, Qian Li, Dong Chen. Study of Steep Rocky Slope Reinforcement and Ecological Protection Engineering near Residential Communities in Mountainous Cities. The National Conference on Slope Engineering Protection, Green and Geological Disaster Prevention and Control Technology Interchange, 2011: 76-81
- [8] TSUKAMOTO Y, KUSAKABE O. Vegetative influences on debris slide occurrences on steep slopes in Japan [C]//Proc. Symp. Effects Forest Land Use on Erosion and Slope Stability. Honolulu: Environment and Policy Institute, 1984.
- [9] POLLEN N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of stream banks: Accounting for soil shear strength and moisture[J]. Catena, 2007, 69(3): 197-205

- [10] 杨永兵,施斌,杨卫东,等. 边坡治理中的植物固坡法[J]. 水文地质工程地质 2002 29(1): 64 – 67 [YANG Yongbing, SHI Bing, YANG Weidong, et al. The method of vegetation for slope protection in slope treatment [J]. Hydrogeology and Engineering Geology 2002 29(1): 64 – 67(in Chinese)]
- [11] 朱锦奇,王云琦,王玉杰,张会兰,李云鹏,刘勇. 基于试验与模型的根系增强抗剪强度分析[J]. 岩土力学 2014 02: 449 – 458 [ZHU Jinqi, WANG Yunqi, WANG Yujie, et al. Analys on the effect of roots on shear strength based on the tested and model [J]. Rock Mechanics 2014 02: 449 – 458]

Research on In-situ Shear Test of Root-soil Composites of the Root System of 4 Arbor Species in Red Clay Slope

LIU Huijiang, LI Guangfan, HU Wei, WEN Wei

(Hainan University Department of civil engineering , Haikou Hainan 570228)

Abstract: In order to study the strengthening effects of root system of arbor and understand the mechanism from root morphology , this article selected 4 arbor species , which is common in tropical rain forest , to do the in-situ shear test and statistical analysis of root system and access to the root and soil under different depth of complex relationship between shear stress and displacement curve. Through laboratory direct shear tests we got shear strength of undisturbed soil , calculate the different root and soil complex soil shear strength growth rate by comparing their distribution. Finally it was concluded that under the condition of the scene in situ , Terminalia Mantaly composite soil shear strength of the growth rate was the biggest , followed by Chinese Bischofwood and Flamboyanttree , Khaya Senegalensis root is the worst. There was an optimal root soil area ratio and it enables the root to stabilize their own to improve the soil shear strength.

Key words: Root system of arbor species; field shear test; stability of soil mass effect of the root system; root and soil composite