DOI:10.15928/j.1674-3075.202110260365

3月

乔木种植位置对岸坡深层锚固作用的影响 -以永定河泛区为例

韩纪坤1,2,赵进勇1,孟闻远2,王 琦1,张 晶1,王伟杰1,彭文启1

(1.中国水利水电科学研究院,北京 100038; 2.华北水利水电大学水利学院,河南郑州 450046)

摘要:以永定河泛区中天堂河下游段两岸作为研究区域,探究该区域不同类型乔木种植位置对岸坡整体锚固作用的 影响,确定坡地区域与坡顶区域最佳的乔木种植方案,以解决洪泛区湿陷性粉质粘土岸坡坡脚处易失稳的安全隐 患。采用拓扑根系描绘法、最大摩擦锚固力计算法、经验公式模型法以及 ABAOUS 有限元模拟法, 分别对根系的形 态、根系的固土性能、根系力学特性以及锚固岸坡整体稳定性进行分析。研究结果表明:(1)由于紫荆根系具有较为 发达的须根,因而具有较强的锚固性能,相较于紫荆,榆叶梅锚固性能相对较差,在同一深度的埋置条件下,二者的 锚固性能相差幅度为5%~25%;(2)当坡地区域的紫荆位于坡脚处,且坡顶区域的榆叶梅位于距离坡肩1.8m处的种 植位置时,岸坡的安全系数达到2.153,岸坡的抗滑锚固效果可达到最佳。坡顶区域与坡地区域的乔木种植位置可 对粉质粘土坡体稳定产生双重耦合的影响,当坡地区域植株的种植位置处于坡脚处时,坡顶处任何区域的乔木根际 土体均可与之形成有效的土拱效应,以遏制岸坡失稳。

关键词:生态护岸;粉质粘土;深层锚固;种植位置;拓扑指数;有限元 中图分类号:X171.4 文献标志码:A 文章编号:1674-3075(2023)02-0044-10

滑坡是主要的山地灾害类型之一(Lee et al, 2008; Peng et al, 2015), 可造成村镇掩埋、交通中断、 厂矿摧毁、河道侵占等重大破坏,且灾害分布广泛, 形成原因复杂,影响因素众多。滑坡诱发和演化机 理的多样性(Fiorucci et al, 2011)、多变性(Mrgrint et al,2013)和复杂性(Li et al,2012)加大了对滑坡的预 测难度(Ermini & Casagli, 2010)。因此, 滑坡地质灾 害一直都是国内外学者非常关注的工程地质问题之 $-(Dave, 2012)_{\circ}$

近年来,植物固土护坡技术被广泛应用于滑坡 治理工程中。植被作为土壤的天然保护屏障(赵进 勇等,2022),对抑制土壤侵蚀(Guo et al,2019)和浅 层滑坡(Burri et al, 2009)起到十分重要的作用。根 土间的固结咬合作用是抑制土体滑动破坏的关键, 该作用机理是通过植物根系调节土体的含水率,以

收稿日期:2021-10-26 修回日期:2022-04-19

基金项目:国家水体污染与治理科技重大专项(2018ZX07105-002);水利部公益性行业科研专项(201501030);中国水科院创新领军 人才项目(WE0145B532017);国家自然科学基金(51809286)。

作者简介:韩纪坤,1996年生,男,在读硕士研究生,主要从事生 态水利工程研究。E-mail: DannyHanjk@foxmail.com

通信作者:赵进勇,1976年生,男,教授级高级工程师,主要从事 河流生态修复等研究。 E-mail:zhaojy@iwhr.com

提升土壤的抗剪强度与柔韧性,进而发挥根土间的 机械咬合作用以形成根土复合体。一般来说,根土 复合体的抗剪强度主要取决于根的密度和抗拉强 度,Abdi等(2019)对根系密度的研究结果表明,在粘 性较低的粗粒状土体中,根系的大量存在使得土体 的黏聚力得以提升,进而显著地改善土体的抗侵蚀 性能;Zhang等(2019)认为根系的抗拉强度会随土壤 水分含量发生显著变化,而根系加固的纤维束模型 表明,随着根系的含水率增加,根系加固能力会随之 降低(Hales & Miniat, 2017); Zhang 等(2020)对苜蓿 根系进行了根系拔出试验,结果表明,苜蓿根系的最 大拔出力随着土壤水分含量的增加呈现线性下降的 趋势;Liang等(2017)认为幼体植物根的抗拉强度与 弹性模量之间也存在明显的线性关系。

目前研究边坡稳定性主要采用试验和数值模拟 相结合的手段。关于根系固土作用的数值模拟研 究,学者们通常将含有根系的土体作为一种抗剪强 度较高的"特殊的土层"进行分析(郝由之等,2020)。 其中,安全系数是衡量边坡稳定性的一项重要指标 (韩纪坤等,2021)。一般来说,边坡的安全系数在很 大程度上取决于根系固结土体的能力大小,同时表 土层厚度和根部密度是影响边坡稳定性的重要因素 (Zhu et al, 2017)。Yao 等(2014)认为植物根对土体 的机械加固在缓解浅层滑坡过程中发挥了重要的作

用;由于乔木根系与抗滑桩的固土机理具有一定相似性,植被通过根系诱导进入土体中,通过降低土体孔隙比与含水率,从而增强了土壤的强度。在相同的含水量下,乔木土壤的吸力相对较大(Das et al,2017); Ni等(2011)认为当土体经过24h的降雨后,乔灌木根系的机械加固范围约为0.5m深度的浅层区域。

由于生态护岸是一个复杂的、动态的系统,而不同的植株种植位置,会对岸坡的稳定性产生非常大的影响。因此本文以永定河泛区中天堂河下游段的两岸作为研究区域,以泛区乔木根系作为研究主体,采用根系拓扑描绘法、最大摩擦锚固力计算法、经验公式模型法、ABAQUS有限元模拟法,探究不同乔木根系形态、不同乔木种植位置对岸坡整体锚固作用的影响,以期为其他地区解决所存在的湿陷性土质边坡易失稳问题提供一定的技术参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

永定河泛区位于华北平原北部,地处京、津两大城市 之间,该区域素有"京畿明珠"之称,地理坐标为东经 116°21′~116°52′,北纬39°18′~39°32′,面积522.65 km²。 永定河泛区属温带大陆性季风气候,多年平均气温 16.0℃,最高气温39.5℃,最低气温-10.9℃。该区域属 河流冲洪积平原,地层岩性主要以第四系全新统地 层(al+plQ4)为主,包括冲洪积粉土、粘土、砂土等土 体。土质以粉质粘土为主,该土质具有以下几个特 点:(1)结构疏松,易受雨水侵蚀;(2)土体呈现垂直 节理发育;(3)土体中含有许多可溶性物质,遇水湿 润后便发生失陷。

永定河泛区的植被类型主要为落叶阔叶林。由 于该地区长期受到人为活动的影响,导致原始植被遭 到严重破坏,现有的植物群落主要以低矮的乔木、灌 丛、稀疏的草本植物以及其他的人工种植作物为主。

1.2 试验树种及方法

紫荆(Cercis chinensis)和榆叶梅(Amygdalus triloba)是永定河泛区中常见的低矮型乔木树种。该区 域的土体具有结构疏松且易沉降的特点;主根粗壮 的乔木会加大岸坡的附加外力荷载,增加作用在河 岸的下滑驱动力,进而降低岸坡的稳定性。基于以 上3点原因,选取树龄范围10~15 a的紫荆和榆叶梅 作为本次岸坡加固研究的树种。

本研究采用根管扫描观测法,根系监测仪器采用"根系原位检测系统(PMT-Root800)"。试验于2020年8月31日至10月9日于永定河泛区中天堂河

下游段的两岸进行。该方法首先利用呈螺旋状的根 钻钻入植株附近的土体内,以形成大小刚好的洞孔; 再将透明的玻璃管或者塑料管放入洞孔中;测量时, 通过放入管内的扫描仪以观测管壁与土壤间界面的 根系生长状况;最后将探测后的根系图像通过计算 机的后处理软件(Root analysis)进行分析处理,即可 获取地下植物根系形态分布原位高清图以及根系直 径、表面积、体积等参数(Upchurch,1984)。

1.3 研究方法

1.3.1 根系拓扑描绘法 此方法的基本原理为通过 计算根系的内外部连接总数之比,以表示根系的分 支特征。为更加详细地描述根系的形态特征,本研 究采用Fitter等(1991)与Oppelt等(2001)提出的修正 拓扑参数计算方法。新的拓扑指数公式如下:

TI=lgA/lgM

1

式中:M为根系所有外部连接的总数;A为最长 根系通道内部连接的总数;TI为拓扑指数。当TI=1 时根系形态为鲱鱼状分支;当TI<1时,根系形态为叉 状分支,其中叉状分支又可分为二分状分支、鲱鱼二 分状分支2种。

1.3.2 根系最大摩擦锚固力计算法 该方法的主要 原理为通过将根系简化为全长粘接型锚杆,其中主 根为垂向、侧根为分支,以探究根系与四周土体的力 学作用(刘小光,2013;韩朝,2020)。本研究采用该 方法以明确各类乔木树种的合理种植区域。具体计 算公式如下:

对于地表下z深度处的根径大于1 mm的任意 根段d/所受的最大静摩擦力合力为:

$$df = A\mu\gamma z = 2\pi r\mu\gamma z dl \tag{2}$$

式中:r为根段的直径;A为根段的表面积;μ为根 土间的摩擦系数;γ为土体的自然容重。

由式②知,对于整个根系,在地下z~z+dz范围内, 根系的最大静摩擦力在铅垂方向上的分量为:

$$\sum df_z = N \cdot 2\pi \bar{r} \cdot \mu z \gamma \cdot dz = 2\pi \mu \gamma \cdot P(z) \cdot Q(z) \cdot z \cdot dz \qquad (3)$$

式中: \bar{r} 为根的平均半径沿深度z方向的分布函数, $\bar{r} = P(z)$;N为根的数目沿深度z方向的分布函数,N=Q(z)。

因而由式③可得,根系的最大锚固力为:

$$F = \int_{0}^{\infty} \sum df_{z} = 2\pi\mu\gamma \cdot \int_{0}^{\infty} P(z) \cdot Q(z) \cdot z \cdot dz \qquad (4)$$

式中:函数 Q(z)与 P(z)通过拟合原位根系测定试 验数据和量测根的数量获得,根土间的摩擦系数可 通过滑动摩擦试验测得。

1.3.3 根系弹性模量经验公式模型法 吕春娟 (2013)通过对蒙古栎、落叶松、和榆树3种北方常见 的落叶阔叶林树种,进行不同标距的单根拉伸试验。 以曲线回归的方式量化弹性模量、直径和标距之间 的关系。最终得出回归模型,见表1。由于本文所研 究的乔木根系与吕春娟试验的根系具有同科同属的 相似物理性质,因此本研究采用试验经验模型,以线 性、指数、对数、乘幂和多项式等方法确定最佳的拟 合曲线,对各类不同标距条件下根系的弹性模量与 直径进行回归分析。

表1 乔木根系平均弹性模量回归方程计算

Tab.1Regression equations giving the averageelastic modulus as a function of arbor root length

根系标距/mm	弹性模量回归方程
50	$E_{50} = 207.11D - 0.2807$
100	E_{100} = 188.13 <i>D</i> -0.2265
150	$E_{150}=217.66D-0.2567$
200	E_{200} =259.11D-0.3025
250	E_{250} =311.56D-0.3425

注:标距为根系的标准长度。

Note: The gauge length is the standard length of the root system.

1.3.4 ABAQUS 有限元模拟法 目前在利用 ABAQUS有限元软件进行边坡稳定性分析时,一般 采用强度折减法来求解安全系数。其原理为把黏聚 力c、內摩擦角 φ 这两大土体力学参数除以折减系数 F_R ,得到的新参数 c_m, φ_m 代入继续折减,直到土体的 某个单元的强度无法匹配它所承受的应力。当土体 单元处于临界点时,此时土体的抗剪强度达到了屈 服点,致使边坡内部形成完整的贯通塑性破坏区域 后,坡体即将失稳。此时的折减系数即为边坡的安 全系数。强度折减系数计算表达式为:

$$c_{m} = c/F_{R}$$

$$\varphi_{m} = \arctan\left(\tan\varphi/F_{R}\right)$$

$$(5)$$

式中:c和φ分别为土体本身的黏聚力与内摩擦角,c_m和φ_m分别为土体发生折减破坏后,土体的黏聚力与内摩擦角,F_p为强度折减系数。

判断临界状态的依据:坡面特征点位移发生突 变;坡内的塑性破坏区域出现贯通现象;有限元计算 不收敛。

2 结果与分析

2.1 根系形态

对乔木根系进行扫描,如图1。紫荆属于水平根 系树种,直立向下的主根形态不大明显,根系的生长以 水平方向的扩展为主,并在水平方向上生长着大量的斜 生根和下垂根。主根发育较深,有80%以上的丛根分布 于30 cm以内的土层范围,主根两侧须根数目众多,且 在树桩下大量生长,根系横向分布范围较宽(图1-a)。

与紫荆不同,榆叶梅为主根系物种,其根系主要 由一个直立向下的主根和分布在中浅层范围内的若 干侧根所组成。大部分须根发育在中层深度附近 (深度范围为60~70 cm),深层区域主根两侧的须根 数量较少,大多数须根呈现纵向延伸,根系横向分布 范围较窄(图1-b)。





依据图1中不同颜色的根系拓扑关系划分根系等级,榆叶梅可分为2级根系,紫荆分为4级根系。不同根系等级的参数如图2。由图2-a、图2-c可知,榆叶梅根系直径等级分为2级,紫荆根系直径等级分为4级;相比于榆叶梅,紫荆的须根数目相对较多,说明紫荆具有较丰富的根径种类。由图2-b、图2-d可知,相较于低等级根系(即须根),2种乔木的最高等级根系(即主根)的总表面积值与总体积值明显较大,说明在这2种乔木根系中,主根是与土壤产生接触的首要部位。

2.2 乔木根系固土护坡的力学特性

2.2.1 最大摩擦锚固力 为研究紫荆和榆叶梅两种 乔木对土壤的摩擦锚固特性,本文进行了3种相同埋 置深度(50、100和150 cm)、相同土质条件(粉质粘 土)的横向比较,见图3。本研究首先通过根土接触 面的剪切试验(Schwarz et al,2010)测定根土间的摩 擦系数(见表2),再结合最大摩擦锚固力公式,以分 析不同树种的锚固性能。

如表2所示,相较于榆叶梅,在同一埋置深度条件下,紫荆的平均摩擦系数较大,这是由于紫荆根系的表面相对粗糙,且具有较多的分叉、根节与根毛,这些因素均有效地增大了根土间的接触面积。随着 埋置深度的增加,两种根系的平均摩擦系数均随之 呈现不同幅度的增加,这是由于随着埋置在根系上





方土层厚度的增加,使得根土间的密实程度随之增加,进一步增大了根土间的摩擦阻力。

表 2 不同乔木树种根系与土壤摩擦系数 Tab.2 Root system and soil friction coefficient for each arbor species

树种	埋置深度/cm	平均摩擦系数
	50	0.551
紫荆	100	0.684
	150	0.718
	50	0.524
榆叶梅	100	0.546
	150	0.607

如图3所示,在相同深度、直径、土质的条件 下,紫荆根系的锚固性能明显优于榆叶梅根系,在 同一深度的埋置条件下,二者的锚固性能相差幅 度为5%~25%。这是由于紫荆根系具有较为发达 的须根,且须根与土体间的摩擦系数较大,这些 因素使得紫荆根系可发挥更好的固土效果。随 着根系的埋置深度的深度越大,根-土界面的摩 擦锚固力越大,这是由于随着埋置的深度的增加, 根系本身需要产生更大幅度的变形,才能与土体 产生足够大的接触面,以最大程度发挥对土体的 加固效果。



图3 不同埋置深度下各类乔木的最大摩擦锚固力

Fig.3 Maximum anchoring force of each arbor species at different planting depths

2.2.2 弹性模量分析 乔木根系的统计特征值见表3和 图4。2种乔木主根根系平均弹性模量表现为紫荆>榆 叶梅,须根根系平均弹性模量表现为榆叶梅>紫荆。

表3 不同乔木根系的弹性模量统计特征值

Tab. 3 Statistical eigenvalues of the elastic modulus for the roots of each arbor species

树种	弹性模量 / MPa	主根弹性模量/ MPa	须根弹性模量/ MPa
榆叶梅	173.244±47.442	161.41±8.88	218.11±35.3
紫荆	210.417±30.231	210.62±16.5	200.64±33.79



泛区乔木的根系弹性模量随着根系直径的增加呈现递减的趋势。如图 4-a 所示,榆叶梅的根系直径与弹性模量呈现单一指数函数分布,大体呈现缓慢的递减趋势。其最优拟合曲线的公式为 $y = 210.549e^{-0.357x} + 77.319$ 。如图 4-b 所示,紫荆的根系直径与弹性模量呈现复合指数函数分布,在 0~1.0 mm的直径范围区间内,呈现急剧下降的态势,在 1.0~2.9 mm的直径范围区间内,呈现半缓递减趋势。其最优拟合曲线的公式 $y = 291.81e^{-0.262x} + 0.000872e^{0.28x} + 192.7$ 。







2.3 边坡模型稳定性

2.3.1 模型构建及参数选取 土壤容重的大小可以反映 植物群落对土壤孔隙状况和持水能力的改善程度。研 究表明,植被恢复通过土壤中所增加的地表凋落物和地 下有机物(细根及根系分泌物),使土壤容重显著降低。

本研究中,土体选取粉质粘土(Colombani et al, 2014)、乔木根土复合土(Horpibulsuk et al, 2010)2种不同的土体,样点坡度为45°。泛区土体的参数见表4, 乔木根系模型参数见表5。

表4 泛区土体参数

Tab. 4 Soil parameters of the floodplain

土质类型	土体重度 /kN·m ⁻³	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩 擦角/º
粉质粘土	17.8	13.8	0.45	9.02	15.98
乔木根土复合体	13.7	土质类型	0.3	15.6	44.7

由于地下根系大致呈现轴对称形状,因此本文 将根系简化为以主根为轴的轴对称图形,并依据表6 中的植物根系拓扑结构参数,对乔木的垂直根及侧 根按照不同根系等级进行简化处理,以实现对根系

表 5	乔木根系模型参数

Tab. 5	Mode	l parameters f	or the	roots of	each	arbor	species
--------	------	----------------	--------	----------	------	-------	---------

植物种类	根系长度/cm	根系直径/mm	主根数目/根	支根数目/根	弹性模量/MPa	泊松比	容重/kN·m ⁻¹
榆叶梅	120/30	2.7/1.51	1	10	161.41/218.11	0.25	12.58
紫荆	100/35/24/15	2.6/1.1	3	30	210.62/200.64	0.25	11.37

注:表中榆叶梅的不同等级根系长度分别为120/30,表示在模拟计算时采用2种不同的根系长度;161.41/218.11为不同根系长度对应的弹性模量。

Note: The length of the *Amygdalus triloba* root system in the table is 120/30, so two different root lengths are used in the simulation; 161.41/218.11 is the elastic modulus corresponding to the root system.

固土过程的模拟研究。如图5所示,榆叶梅的分支形 状呈鲱鱼状,紫荆的分支形状呈鲱鱼二分状。

由于紫荆具有较强的锚固性能,因此坡地区域 的植株选择种植紫荆,使其发挥桩筋的作用,以遏制 坡脚处及坡地区域土体的塑性变形;而在坡顶区域 选择种植榆叶梅,使其发挥锚固杆的作用,以固定坡 体上部的滑动土体。本研究将以L_x/L₁、L_y/L₂来分别 阐述紫荆与榆叶梅的种植位置。

表 6 植物根系拓扑结构参数 Tab. 6 Topological structure parameters of the roots for each arbor species

植物种类	根系分级数	根系所有外部连接的总数	最长根系通道内部连接的总数	拓扑指数	分支类型
榆叶梅	2	11	11	1.000	鲱鱼状分支
紫荆	4	14	9	0.833	鲱鱼二分状分支



Fig.5 Schematic diagram of the arbor planting positions

L,为紫荆树干中心点到坡脚处的水平距离;

L,为榆叶梅树干中心点到坡肩处的水平距离;

L₁为坡地区域的水平宽度;L₂为坡顶区域的水平 宽度;

*L*_x/*L*₁取值:0、0.1 (即紫荆树干中心点到坡脚处的水平距离,取值分别为0、0.3 m);

*L*₁/*L*₂取值:0.6、0.7、0.8、0.9(即榆叶梅树干中心点 到坡肩处的水平距离,取值分别为1.8、2.1、2.4、2.7 m)。

2.3.2 不同工况模拟 当紫荆位于 $L_x/L_1=0$ 处时,坡顶 处榆叶梅不同种植位置的岸坡塑性变形如图6。由于坡脚处紫荆根系的存在,且该根系的长度贯穿了 坡脚处滑动面的起始位置,使得原有的潜在滑动面 有所下移。这样的结果正好印证了Genet等(2008)的观点。滑动面的下移,使得位于 $L_y/L_2\ge0.6$ 种植区域的榆叶梅根系均处于滑裂面以下,而植物根系将 有效阻碍坡体的滑动,这样工况的模拟结果证实 De Baets(2007)的观点。

Xu(2013)认为土拱效应随着锚固杆间距的增加 而减小。在本文中,当紫荆位于坡脚处时,在坡顶处 任何区域的榆叶梅根际土体均可与之形成有效的土 拱效应。当榆叶梅处于L,/L₂=0.9处时,滑裂面的深度 相对较浅,土拱效应相对较弱,该模拟结果印证了Xu (2013)提出的观点;当榆叶梅位于L,/L₂=0.6处时,如 图6-a所示,此时榆叶梅与紫荆间的主根间距较小,土 拱效应最为显著。此时,紫荆与榆叶梅的根系可充分 发挥其抗剪作用,有效地阻隔滑动面的贯通,产生良 好的抗滑锚固效果,滑动面下移后,滑弧增长,间接增 大了岸坡的抗滑力,有助于增强岸坡的整体稳定性。



图6 紫荆位于L_x/L₁=0处时坡顶处榆叶梅不同种植位置的岸坡塑性变形

Fig. 6 When *Cercis chinensis* is located at $L_x/L_1=0$ point, plastic deformation map of the slope for different *Amygdalus triloba* planting positions at the top of the slope

当紫荆位于L_x/L₁=0.1处时,坡顶处榆叶梅不同种 植位置的岸坡塑性变形见图7。当紫荆的种植位置远 离坡脚处时,此时两大乔木根际土之间没有形成有效 的土拱效应,导致岸坡的滑动面无法得以下移。

在图 7-a中,当榆叶梅位于 L,/L₂=0.6处时,其根 系处于滑裂面以上,由于其垂向的根系未穿过滑裂 面,则榆叶梅的根系整体将对滑坡体无法产生有效 的锚固作用;当榆叶梅处于 L,/L₂>0.7 区域时,如图 7-b、图 7-c、图 7-d所示,其根系处于滑裂面以下,可 有效阻止坡体内部的滑动,随着 L,/L₂比值的增加,岸 坡塑性值随着滑裂面以下土层含根量的增加而减 小,须根加筋作用明显,即该工况下榆叶梅根系固土 的主要作用部位为须根,Comino & Druetta(2010)通 过大量的根土剪切试验,得出了须根通过增加土壤 的剪切强度,以延缓土体滑动的结论,本工况的模拟 结果佐证了该结论的正确性。

2.4 强度折减安全系数

不同乔木种植位置对岸坡安全系数的影响见 图 8。如图 8-a 所示,当紫荆位于 L,/L₁=0 处时,安全 系数随着 L,/L₂值的增大而减小,二者呈负相关。当 榆叶梅位于 L,/L₂=0.6 处时,岸坡的安全系数达到 2.153,同比素土边坡安全系数增加61.2%,该工况下 榆叶梅与紫荆间的主根间距较小,二者的根系可充 分发挥其抗剪作用,且两大乔木的根际土体之间形 成了土拱效应,使得潜在滑动面最大程度地向坡体 内部下移,进而有效地阻隔滑动面的贯通,最终产生 了图 8-a 中最佳的锚固效果。

当紫荆位于L,/L₁=0.1处时,安全系数随着L,/L₂值 的增大而增大,二者呈正相关。这是因为当紫荆位于 远离坡脚的位置时,岸坡的潜在滑动面未能有效地向



图7 紫荆位于L_x/L₁=0.1处时榆叶梅不同种植位置的岸坡塑性变形

Fig. 7 When *Cercis chinensis* is located at $L_x/L_1=0.1$ point, Plastic deformation map of the slope at different *Amygdalus triloba* planting positions at the top of the slope



图8 榆叶梅种植位置对岸坡安全系数的影响

Fig.8 Effect of the arbor planting position on the embankment safety factor

坡体内部下移,此时榆叶梅的须根在岸坡的加固过程 中发挥主要作用,即岸坡的加固效果取决于滑动面以 下榆叶梅的须根数量。当榆叶梅位于L,/L₂≥0.7的区 域时,植物根系处于滑动面以下,随着L,/L₂比值的增 加,滑裂面以下土层含根量也随之增加,须根加筋作 用明显。其中在榆叶梅位于L,/L₂=0.9处时,安全系 数最大可达到为2.326,此时榆叶梅的须根在图8-b 中加筋效果最好,本研究通过将该工况与上一段中 提及的最优工况进行综合对比,认为后者工况的岸 坡整体加固效果更好。

3 结论与建议

(1)由于紫荆根系浅层具有较为发达的须根,同时主根发育较深,根系横向分布范围较宽,因而紫荆 具有较强的锚固性能。相较于紫荆,榆叶梅锚固性 能相对较差。在同一深度的埋置条件下,二者的锚 固性能相差幅度为5%~25%。

(2) 坡地区域与坡顶区域种植乔木的位置可共 同影响坡体滑裂面的深度与宽度。

当坡地区域植株的种植位置处于坡脚处时,坡 顶区域任何位置的乔木根际土体均可与之形成有效 的土拱效应。坡顶区域种植乔木距离坡肩的水平距 离越小,两种植株的根系可有效充分发挥固土作用, 产生良好的抗滑锚固效果。

当坡地区域植株的种植位置远离坡脚处时,坡顶 处区域的根系土体未能完全形成有效的土拱效应。 坡顶区域的乔木根系只能通过滑裂面土层以下须根 的加筋作用来加固土体。当坡顶区域种植乔木距离 坡肩的水平距离越大时,植物根系处于滑裂面以下的 部分越大,使得根系阻碍边坡滑动的效果越好。

由于季节、光照、水分等自然因素的不同,会导 致相同种类植株的根系表现出不同的生长情况。今 后需要对这些因素加强进一步的考虑。

参考文献

- 韩朝,2020.风荷载下刺槐力学响应研究[D].北京:北京林业 大学.
- 韩纪坤,赵进勇,孟闻远,等,2021.一种新型竹材生态护岸型 式及其稳定性模拟分析[J].水利水电技术(中英文),52 (1):176-184.
- 郝由之,赵进勇,路明,等,2020.复合植被根系作用对生态岸 坡稳定性的影响[J].水生态学杂志,41(3):42-50.
- 刘小光,2013. 林木根系与土壤摩擦锚固性能研究[D].北京: 北京林业大学.
- 吕春娟, 2013. 乔木根系抗拉力学特性及其与化学成分关系

[D].北京:北京林业大学.

- 赵进勇,于子铖,张晶,等,2022.国内外河湖生态保护与修复 技术标准进展综述[J].中国水利,(6):32-37.
- Abdi E, Saleh H R, Majnonian B, et al, 2019. Soil fixation and erosion control by Haloxylon persicum roots in arid lands, Iran[J]. Journal of Arid Land, 11(1):88–98.
- Burri K, Graf F, A Böll, 2009. Revegetation measures improve soil aggregate stability: a case study of a landslide area in Central Switzerland. [J]. Forest Snow & Landscape Research, 82(1):45–60.
- Colombani N, Mastrocicco M, Giuseppe D D, et al, 2014. Variation of the hydraulic properties and solute transport mechanisms in a silty-clay soil amended with natural zeolites[J]. Catena, 123:195–204.
- Comino E , Druetta A, 2010. The effect of Poaceae roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment [J]. Soil and Tillage Research, 106(2):194–201.
- Das G K, Hazra B, Garg A, et al, 2017. Impact of Hydrological and Mechanical Correlations on the Reliability of Vegetated Slopes[J]. ASCE–ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part A Civil Engineering, 3 (4):04017029.
- Dave Petley, 2012. Landslide defeat[J]. New Scientist, 216 (2887):26-27.
- De Baets S, Poesen J, Barberá G G, et al, 2007. Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff[J]. Plant Soil, 294(1/2):169–183.
- Ermini L, Casagli N, 2010. Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomor- phological dimensionless index[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 28(1):31– 47.
- Fiorucci F, Cardinali M, Carlà R, et al, 2011. Seasonal landslide mapping and estimation of landslide mobilization rates using aerial and satellite images[J]. Geomorphology, 129(1):59–70.
- Fitter A H, Stickland T R, Harvey M L, et al, 1991. Architectural an alysis of plant root systems. I. Architectural correl ates of exploitation cfficiency[J]. New Phytologist, 118(3):375–382.
- Genet M, Kokutse N, Stokes A, et al, 2008. Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability[J]. Forest Ecology and Management, 256(8):1517–1526.
- Guo W Z, Chen Z X , Wang W L , et al, 2019. Telling a different story: The promote role of vegetation in the initiation of shallow landslides during rainfall on the Chinese Loess Plateau[J]. Geomorphology, 350:106879.

- Hales T C, Miniat C F, 2017. Soil moisture causes dynamic adjustments to root reinforcement that reduce slope stability[J]. Earth Surface Processes and Landforms: The journal of the British Geomorphological Research Group, 42(5): 803–813.
- Horpibulsuk S, Rachan R, Chinkulkijniwat A, et al, 2010. Analysis of strength development in cement–stabilized silty clay from microstructural considerations[J].Construction & Building Materials,24(10):2011–2021.
- Lee C T, Huang C C, Lee J F, et al, 2008. Statistical approach to earthquake–induced landslide susceptibility[J]. Engineering Geology, 100(12):43–58.
- Li X, Kong J, Wang Z, 2012. Landslide displacement prediction based on combining method with optimal weight[J]. Natural Hazards, 61(2):635–646.
- Liang, Bengough, AG, et al, 2017. Scaling of the reinforcement of soil slopes by living plants in a geotechnical centrifuge[J]. Ecological Engineering, 109(Part B):207–227.
- Mrgrint M C, Grozavu A, Patriche C V, 2013. Assessing the spatial variability of coefficients of landslide predictors in different regions of Romania using logistic regression[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 13(12):3339–3355.
- Oppelt A L, Kurth W, Godbold D L, 2001. Topology, scaling relations and Leonardo's rule in root systems from African tree species[J]. Tree Physiology, 21(23):117–128.
- Peng J, Fan Z, Wu D, et al, 2015. Heavy rainfall triggered

loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China[J].Engineering Geology, 186:79-90.

- Schwarz M, Cohen D, Or D, 2010. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles[J]. JJournal of geophysical research. Earth Surface: JGR, 115 (F4):F04035. https://doi.org/10.1029/2009JF001603.
- Upchurch D R, 1984. Battery–operated color video camera for root observations in mini–rhizotrons[J]. Agronomy Journal, 76(6):1015–1017.
- Xu J C, 2013. Analytic hierarchy process for assessing factors influencing the stability of soilslopes reinforced with piles [J]. Springer Berlin Heidelberg,70(4): 1507–1514.
- Yao X , Wang L, Liu J, et al, 2014. Biomechanics and Utility of Shallow Soil Fixation by Sabina Valgaris Ant. Roots in Arid and Semiarid Soils[J]. Sensors & Transducers, 167 (3):129–134.
- Zhang C, Liu Y, Liu P, et al, 2020. Untangling the influence of soil moisture on root pullout property of alfafa plant[J]. Journal of Arid Land, 12(4):666–675.
- Zhang C, Xia Z, Jing J, et al,2019. Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants[J]. Catena, 172:140–147.
- Zhu H, Zhang L M, Xiao T, et al, 2017. Enhancement of Slope Stability by Vegetation Considering Uncertainties in Root Distribution[J]. Computers and Geotechnics, 85(3):84-89. (责任编辑 郑金秀)

Effect of Planting Position and Arbor Type on the Anchorage Depth of the Yongding River Floodplain Embankment

HAN Ji-kun^{1,2,} , ZHAO Jin-yong¹, MENG Wen-yuan², WANG Qi¹, ZHANG Jing¹, WANG Wei-jie¹, PENG Wen-qi¹

 (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P.R. China;
 2. School of Water Conservancy, School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, P.R. China)

Abstract: Embankment stability is crucial for ecological restoration and embankment greening. Here, two banks of the lower Tiantang River in the Yongding River floodplain were selected for investigation. We explored the effect of arbor type and planting location on revetment effectiveness and overall embankment stability. The objective was to determine the optimal planting scheme at the top and bottom of the slope to lower the potential hazard of bank collapse due to instability at the foot of the embankment. Four methods were employed to analyze the root morphology, soil-anchor performance of the root system, root mechanical characteristics and anchored-slope stability. The methods included root morphological topology, calculated maximum frictional anchoring force, an empirical model and the ABAQUS finiteelement simulation. From August 31 to October 9, 2020, research on embankment anchoring was carried out on both banks of the lower Tiantang River, and Cercis chinensis and Amygdalus triloba (10-15 m) were selected as the test arbor species. Results show that: (1) C. chinensis, with a more well-developed fibrous root system, provided stronger anchoring than A. triloba. At the same planting depth, the difference in anchoring strength was 5%-25%. (2) When C. chinensis was planted at the foot of the slope and A. triloba was planted at the top, 1.8 m from the slope shoulder, the anti-slip anchoring effect on the embankment was strongest, with a safety factor of 2.153. This study demonstrates that arbor planting positions at the top and bottom of the slope has a coupling effect that stabilizes the silty clay slope. When arbors are planted at the foot of the slope, rhizosphere soil associated with the arbor at the top produces an effective soil arching effect that stabilizes the embankment.

Key words: ecological revetment; silty clay soil; deep anchorage; planting position; topological index; finite element