DOI:10.15928/j.1674-3075.2020.03.006

复合植被根系作用对生态岸坡稳定性的影响

郝由之[1,2],赵进勇[1],路 明[3],王 琦[1],彭文启[1],陈 卓[1]

(1.中国水利水电科学研究院,北京 100036;
2.南京水利科学研究院,江苏 南京 210009;
3.河北工程大学,河北 邯郸 056038)

摘要:生态护岸中植被根系的固土护岸效果缺乏可测性和可控性,为了确定植物根系存在对岸坡稳定性提升的量化作用,以北京市永定河莲石湖段生态岸坡为试验区,测定生态岸坡上种植典型"草-灌-乔"植被根系的形态分布及特征参数,在根系参数测定结果的基础上分析生态岸坡稳定性。通过建立根系加筋作用的力学模型,并采用基于加筋理论的极限平衡法,对岸坡浅层稳定性进行分析计算,岸坡整体稳定性采用基于强度折减原理的ABAQUS有限元模型计算法。结果表明,草本和灌木根系的加筋作用有助于提升岸坡浅层土体的粘聚力、抗剪强度和稳定性;草本和灌木根系的加筋作用对岸坡整体稳定性的影响远小于乔木根系的锚固作用,乔木种植于坡脚处对岸坡稳定性的提高最有利,岸坡安全系数可提升5.16%;乔木根系长度是岸坡整体稳定性重要的影响因素,乔木根系长度由1 m增加至3 m,生态岸坡整体稳定安全系数较素土岸坡分别增加了1.25%和14.2%,且增强速率逐渐变大;在水位变动时,生态岸坡与素土岸坡相比,其稳定安全系数最高可提升7.87%。根据岸坡浅层稳定性及整体稳定性计算结果,可以明确植被根系浅根加筋作用及深根锚固作用对岸坡土体的稳固效果,从而确定各类植被的配置方式,为生态护岸工程设计与应用提供参考。

关键词:生态护岸;植被根系;极限平衡法;有限元;岸坡稳定性

中图分类号:X171.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2020)03-0042-09

生态护岸是河流生态修复工程中的关键技术,是为防止河岸失稳而在坡面做的各种铺垫和栽植的统称(刘黎明等,2007;梁开明等,2014);该技术涵盖植物学、生态学、水利学等多门学科(Odum,1971);目前河流护岸建设还很难将多门学科结合起来,在河岸建造时往往以水利工程学科内容为指导,侧重于其安全性和耐用性,大量采用刚性护岸材料,严重破坏了河流生态廊道的完整性和连通性(Nakamura et al,2002);河岸工程在设计时,除满足防洪安全、岸坡防护、环境美好等功能外,还应兼顾维护各类生物适宜栖息地和生态景观完整性的功能(董哲仁,2013;董哲仁等,2014)。选择合适的植物种类对于生态护岸项目的成功实施非常关键。在岸坡防护中,需要草本和木本植物搭配种植(赵进勇等,2007)。因此,有必要研究各类植物根系对岸坡稳定性提升的量化作用,以便合理选取护岸植物类型及配置方式,更好地进行生态护岸工程设计。

目前通常从试验研究、理论分析、数值模拟等方面探究植物根系对岸坡的稳固作用,一般是通过对岸坡含根土样进行直剪试验,测定土体抗剪强度,Manbeian(1973)研究了向日葵等根系加筋作用对土体抗剪强度的增强作用;张飞等(2005)通过对素土边坡与生态边坡表层土的直剪试验研究,发现土体的抗剪强度随土中根系密度增加而增加,当根系密度超过某一极限值,不再有正相关趋势。理论分析方面一般需要建立根土相互作用模型,解明曙(1990)建立了根土净摩擦阻力的极限平衡方程,导出全根系固土力学机制的计算式;张云伟等(2002)基于摩尔库伦准则建立了极限平衡条件下的摩擦型根土粘合键破坏模型。数值模拟方面,翟志雄(2013)运用ANSYS软件中有限元强度折减法计算边坡稳定性系数,从而判断边坡是否稳定;张建等(2008)将摩尔库伦准则运用到限元中,分析了边坡稳定性。测试研究可能会因取土样时的土体密实度改变和根系与土体间粘结效果的改变而存在一定误

收稿日期:2018-10-01

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07105-002);水利部公益性行业科研专项(201501030);水利部技术示范项目(SF201808);中国水科院基本科研业务费专项(WE0145B532017)。

作者简介:郝由之,1994年生,女,在读研究生,专业方向为水工结构。E-mail:hao_youzhi@foxmail.com

通信作者:赵进勇,男,教授级高级工程师。E-mail:zhaojy@iwhr.com

差。因此，本文对根系固土作用研究时，采用基于加筋理论的极限平衡法对岸坡浅层稳定性安全系数进行定量计算，整体稳定性安全系数采用基于强度折减原理的有限元模型进行定量计算，以期为生态岸坡的稳定性评价提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

以永定河莲石湖段为研究区段，其岸坡植物配置方式为生态岸坡种植乔灌草，滩地种植灌木和地被，水边种植水生植物及湿生植物。试验区域取滩地以上生态岸坡，为草-灌-乔组合式护岸，其中草本为狗牙根（*Cynodon dactylon*），种植密度约为 15 棵/100 cm^2，灌木为连翘（*Forsythia suspensa*），种植间隔为 1 m，乔木采用榆树（*Ulmus pumila*）。

根系监测仪器采用“根系原位检测系统（RootScanner-R）”。试验前期在永定河典型植物根系周围埋入根系原位监测微根管，测量时将探测仪放入管内进行探测，探测完毕后通过计算机处理探测仪所得数据，即可获取地下植物根系形态分布原位高清图及根系的长度、直径、表面积、体积等参数。

1.2　生态岸坡浅层稳定性

1.2.1　基于加筋模型的极限平衡法　假定浅层滑动面为平面，且平行于坡面，滑体的形状为矩形，暂不考虑水位变化的影响。关于岸坡浅层稳定性，此处考虑滑动面处根系的加筋作用及滑体侧面根系对土体抗剪强度的增加作用（Bache & Macaskill，1983；嵇晓雷，2013），滑体深度大于根系长度时，根系侧边加筋作用深度取根系长度即可，最终得到岸坡浅层稳定安全系数的表达式为：

$$F_S=\frac{R}{T}=\frac{\left(c+\gamma z\ \tan\varphi+\frac{T_N A_r\delta}{A_S}\right)LB+2c(L+B)/z\cos\alpha+2\frac{T_N A_r\delta}{A_s}(L+B)z/\cos\alpha}{\gamma LB_Z\ \sin\alpha}$$

$$=\frac{\left(c+\gamma z\ \tan\varphi+\frac{T_N A_r\delta}{A_S}\right)LB+2(L+B)(c+\frac{T_N A_r\delta}{A_S})z/\cos\alpha}{\gamma LB_Z\ \sin\alpha}$$

$$=\frac{\left(c+\gamma z\ \tan\varphi+\frac{T_N A_r\delta}{A_S}\right)B+2(1+\frac{B}{L})(c+\frac{T_N A_r\delta}{A_S})z/\cos\alpha}{\gamma LB_Z\ \sin\alpha}$$

式中：T -滑体的下滑力（kN）；R -滑体的抗滑力（kN）；α -岸坡坡角；φ -土的内摩擦角；L -滑体沿斜坡方向的长度（m）；B -滑体的宽度（m）；z -滑体深度（m）；A_r -根系的横截面积（m^2）；A_s -根土复合体的横截面积（m^2）；T_N -根的抗拉强度（kPa）；c -土的粘聚力（kPa）；β_r -根发生变形后的倾斜角（一般取 60°）；δ -常数（$\delta=\sin\beta_r+\cos\beta_r\tan\varphi$）。

1.2.2　岸坡浅层稳定性参数　采取永定河岸坡黄黏土参数。假定加筋土和素土的重度相等，均为 23 kN/m^3，粘聚力为 15 kPa，内摩擦角为 18°，拟定岸坡坡比为 1∶1。

对于狗牙草生态护岸，根系直径取试验测定均值 0.25 mm，种植密度取最大密度 25 棵/100 cm^2，根系抗拉强度参考嵇晓雷（2013），取 102.97 MPa。

对于连翘生态护岸，根系直径取试验测定均值 2 mm，连翘冠幅较大，故其最大密度取 1 棵/m^2，根系抗拉强度依据参考彭书生（2007），取 185.6 MPa。

1.3　生态岸坡整体稳定性

1.3.1　基于强度折减原理的有限元法　在岩土工程领域中，计算土体边坡稳定性时，一般将强度折减原理应用于有限元软件中进行分析。强度折减法可直接通过有限元数值模拟计算获得岸坡稳定安全系数，在工程应用中较为普遍，其折减后的抗减强度参数表达式如下：

$$c_m=c/F_r$$

$$\varphi_m=\arctan(\tan\varphi/F_r)$$

式中：c、φ -土体所能提供的抗减强度值；c_m、φ_m -维持平衡所需要的抗减强度值；F_r -为强度折减系数。

计算中，假定不同的强度折减系数 F_r，达到临界破坏时的强度折减系数 F_r 就是边坡稳定安全系数 F_s。

1.3.2　根土复合体模型确定

（1）岸坡体模型。土体模型选用理想弹塑性模型，并采用该摩尔库伦本构模型描述土体特性。岸坡几何体模型为永定河莲石湖段河漫滩地以上的生态岸坡。模型左右两侧边界采用水平方向约束，底面采用水平和竖直双向约束。试验区土体岸坡为回填土，其性质偏粘性土，呈黄褐色，可塑，土质均匀（卜凡杰和李小勇，2012），岸坡坡脚以下为淤泥质黏土。土壤具体参数如表 1。

表1 岸坡模型土体参数

Tab.1 Soil parameters for the bank slope model

岸坡土体	含水率/%	内摩擦角/°	粘聚力/kPa	重度/kN·m^{-3}	弹性模量/MPa	泊松比
坡脚以上	8	18	15	23.0	100	0.30
坡脚以下	18	11	12	26.2	45	0.35
水位以下	20	16	14	25.4	75	0.30

(2)植被根系模型。根系设为弹性材料,类型采用梁单元。土体对根系的约束采用嵌入区域进行模拟,将根系以区域嵌入到周围土体中去。本次研究区生态岸坡采取“草-灌-乔”相结合的方式进行护岸,岸坡植被根系特征参数由根系原位监测系统测定,植被根系强度利用试验测定的根系直径参数通过查阅文献取值(周朔,2011),具体参数如表2。

2 结果与分析

2.1 根系形态和特征

2.2.1 根系形态分布 由图1可知,狗牙根根系为须根型,须根细而紧密,分布较广;连翘根系为侧生根型,主根(红色)不太显著,但其侧根(绿色)都较粗且长,侧根众多;榆树为主直根型,主根(红色)较为粗壮,支根(绿色)较细。

表2 根系模型参数

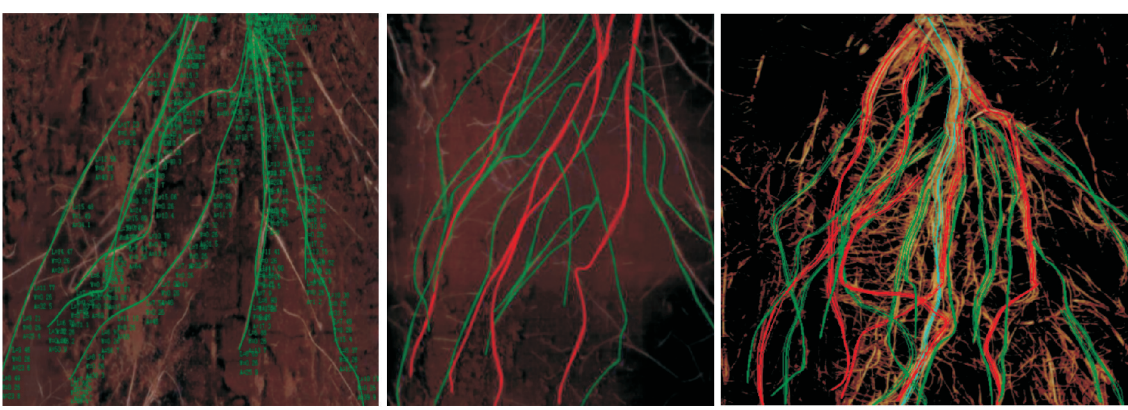
Tab.2 Parameters for the root model

植物种类	根系长度/cm	根系平均直径/mm	主根数/根	支根数/根	弹性模量/MPa	泊松比
狗牙根	30	0.25	1	4	1400	0.25
连翘	60	2	1	6	600	0.25
榆树	100/150/200	4/5/6	1	8/10	180/150/120	0.25

注:表中榆树根系长度为100/150/200,表示在模拟计算时采用3种不同的根系长度;180/150/120为根系对应的弹性模量。

Note: The length of the elm root system in the table is 100/150/200, which means that three different root lengths are used in the simulation calculation; 180/150/120 is the elastic modulus corresponding to the root system.

2.1.2 根系特征参数 根系长度是表明根系吸收功能的一个重要参数。测定结果表明,狗牙根和连翘根系分别集中分布在深度为30 cm和60 cm以内的浅层土体中,榆树根系主要集中分布在深度为100 cm范围内的土层中,但随着年限增加可生长至3 m以上。



(a)狗牙根*Cynodon dactylon* (b)连翘*Forsythia suspensa* (c)榆树*Ulmus pumila*

图1 三类典型植被根系扫描结果

Fig.1 Scan pictures of the three typical vegetation root system

根表面积和体积可以反映不同土层深度根系的分布,基于根系表面积及体积得出3种植物根系分布均随着土层深度的增加逐渐减少的规律,同时得出狗牙根、连翘和榆树根系平均直径分别约为0.25 mm、2 mm和5 mm。

2.2 岸坡浅层稳定性

2.2.1 根系对土体抗剪强度及粘聚力的影响 以不同土层深处为剪切面,研究狗牙根和连翘根系加筋作用下根土复合体的抗剪强度及粘聚力变化,基于计算结果,对狗牙根和连翘根系的加筋作用进行对比,得到3种岸坡土体抗剪强度和粘聚力随土层深度变化关系,如图2~3。

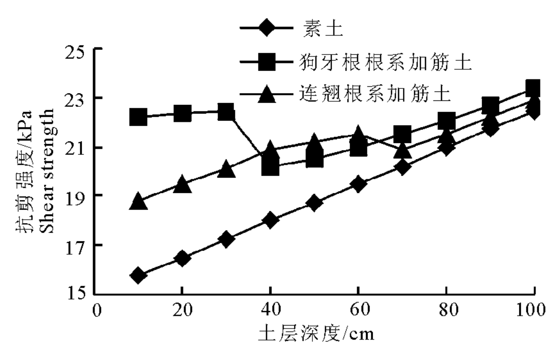


图2 3种岸坡土体抗剪强度随土层深度的变化

Fig.2 Relationship between shear strength of three bank slope soils and soil depth

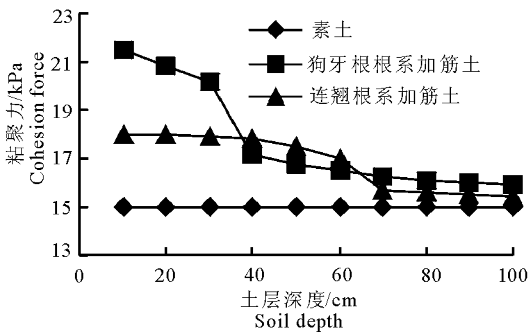


图 3　3 种岸坡土体粘聚力随土层深度的变化

Fig.3　Relationship between cohesive force of three bank slope soils and soil depth

由图 2～3 可知,在土层深度 30 cm 范围内和土层深度超过 60 cm 时,狗牙根根系对岸坡土体抗剪强度和粘聚力的增强作用大于连翘根系;在土层深度 30～60 cm,连翘根系对岸坡土体抗剪强度和粘聚力的增强作用大于狗牙根根系;在土层深度超过 60 cm 时,两种植物根系对岸坡土体抗剪强度和粘聚力的增强作用均较小。

综合看来,狗牙根和连翘同时以最大间距种植时,狗牙根根系加筋作用强于连翘,加筋范围也大于连翘,原因在于狗牙根冠幅小,连翘冠幅大,在同等坡面面积及同等滑体侧面积上,狗牙根根系数量及面积所占比例高于连翘根系。

2.2.2　根系对岸坡浅层稳定性的影响　随着根系加筋作用对土体抗剪强度及粘聚力的提升作用,岸坡浅层稳定性也会随之增加。通过对狗牙根和连翘根系的加筋作用对比,得到 3 种岸坡土体的安全系数随土层深度的变化关系,如图 4。

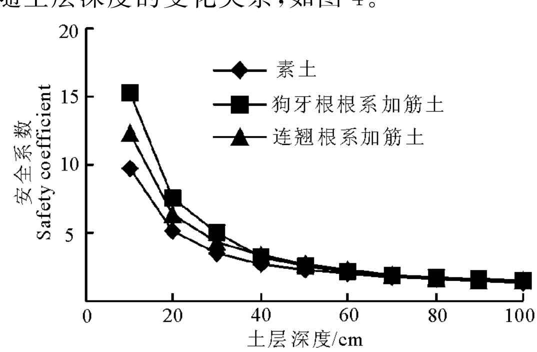


图 4　3 种岸坡浅层稳定安全系数随土层深度的变化

Fig.4　Relationship between the stability safety coefficient of three shallow bank slopes and soil depth

由图 4 可知,在土层深度 30 cm 内,狗牙根和连翘根系均对岸坡浅层稳定性提升作用较大,且狗牙根根系作用大于连翘;土层深度 30～60cm,狗牙根和连翘根系对岸坡浅层稳定性提升作用逐渐减小,且连翘根系作用大于狗牙根;在土层深度超过 60 cm 时,狗牙根和连翘生态岸坡的稳定性与素土岸坡趋于一致,说明植物根系对岸坡稳定性的影响有限。随着深度增加,其根系加筋作用对岸坡稳定性影响逐渐减小,可见草本与灌木根系主要起岸坡浅层稳固作用。

2.3　岸坡整体稳定性

2.3.1　初始条件下的岸坡整体稳定性　为研究草本、草本灌木及“草-灌-乔”组合 3 种不同护岸方式的岸坡整体稳定性,首先拟定初始条件的岸坡坡比为 1∶2,坡高为 3 m,暂不考虑水位对岸坡土体影响。草本采用狗牙根,在岸坡横断面方向上种植间距为 30 棵/m,根长 0.3 m;灌木采用连翘,种植间距为 1 棵/m,根长 0.6 m;乔木采用榆树,在模型中布于坡脚处,根长 2.0 m。经模拟计算,得出岸坡整体稳定安全系数如表 3。

表 3　初始条件下岸坡整体稳定安全系数

Tab.3　Overall stability safety coefficient of bank slope under initial conditions

岸坡高度/m	岸坡稳定安全系数			
	素土岸坡	草本生态护岸	草-灌生态护岸	草-灌-乔组合生态护岸
3	2.402	2.412	2.415	2.526

由表 3 可见,素土岸坡、草本生态护岸、草-灌生态护岸、草-灌-乔组合生态护岸的岸坡整体稳定安全系数依次增大,但植被根系所起作用程度不同。3 种生态护岸相对于素土岸坡增加的安全系数分别为 0.42%、0.54%、5.16%。

综合看来,狗牙根及连翘根系对岸坡整体稳定性的增强作用较小,因为草本灌木根系较浅,主要起坡面浅层防护作用,其对于岸坡整体稳定性的提升作用是通过对坡面浅层土体的加筋作用逐渐传递、影响至坡体深处产生的,因此对坡体深层抗滑作用较小,这一结果也印证了岸坡浅层稳定分析中基于根系加筋模型的计算结果;而草-灌-乔组合生态护岸比素土岸坡增加的安全系数高于前两种生态护岸,表明榆树相对于狗牙根和连翘而言,其根系具有深层抗滑作用,发达根系可以将岸坡上部不稳定滑体与下部稳定土体紧密地锚固绑定,所以乔木根系对岸坡整体稳定性的提高最为有利。

2.3.2　乔木根长对岸坡整体稳定性的影响　通过对初始拟定条件的模拟可知,草本及小型灌木根系较短,因此对岸坡的稳固作用有限,其主要作用为浅层加筋稳固,起深层锚固作用的主要是根系较为发

达的乔木，因此研究根系长度对岸坡稳定性影响时，只改变草-灌-乔组合生态护岸中榆树根系的长度，模拟中榆树根系分别取1、2、3 m。经计算，得出榆树根系长度与岸坡稳定性关系如图5；岸坡潜在滑动面如图6。由图5可知，随着榆树根系长度的增加，生态护岸的整体稳定性呈增强趋势。榆树根系长度为1、2、3 m时，生态岸坡相对于素土岸坡的安全系数分别增加了1.25%、5.16%、14.2%，可见乔木根系长度是岸坡整体稳定性较为重要的影响因素，且随着根系长度的增加，岸坡整体稳定性的增长速率也在加快。

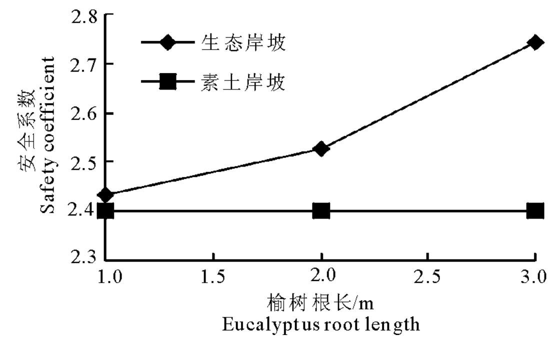
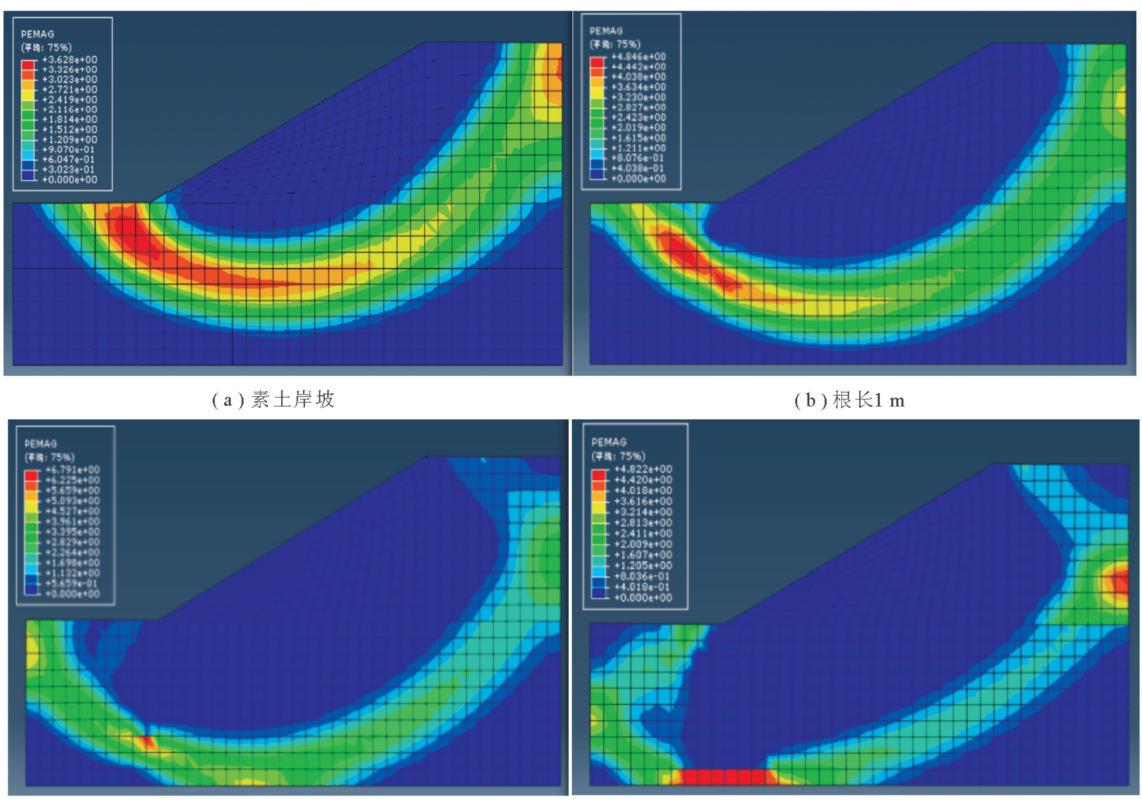


图5　岸坡整体稳定性随榆树根长变化关系

Fig.5　Relationship between overall stability of bank slope and root length of elms



(a) 素土岸坡　(b) 根长1 m

(c) 根长2 m　(d) 根长3 m

图6　不同榆树根长的岸坡潜在滑动面模拟

Fig.6　Potential sliding surface of bank slope with different root lengths

对于图6的模拟结果，可从两方面分析岸坡整体稳定性。从岸坡潜在滑动面来看，随着榆树根系长度的增加，潜在滑动面有所下移，根系会逐渐伸至岸坡原滑动面，此时，根系会充分发挥其抗剪作用，有效阻隔滑动面的贯通，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；从应力关键点来看，素土岸坡应力变化最大位置在坡脚滑出口处，即潜在破坏部位处于岸坡表面，难以受四周土体围压而保持稳定，所以岸坡稳定性相对较低，而生态岸坡的应力变化最大位置随着根系长度的增加逐渐下移，潜在破坏部位处于岸坡体深处，可以受四周土体围压而保持稳定，故岸坡稳定性相对较高。

2.3.3　乔木种植位置对岸坡整体稳定性的影响

由于乔木根系对岸坡整体稳定性的影响较为明显，因此研究种植位置对岸坡稳定性的影响时，考虑仅改变生态护岸中榆树的种植位置，以坡高3 m为例，榆树分别位于 $L_x/L=$ 0、1/8、1/4、3/8、1/2、5/8、3/4、7/8、1处，在下文中编号依次为1～9，其位置如图7；榆树种植位置与岸坡整体稳定性关系图如图8；榆树分布于岸坡不同位置的岸坡潜在滑动面如图9。

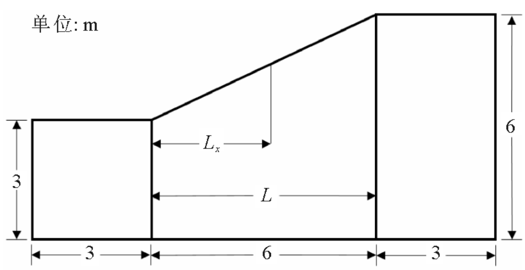


图 7　榆树种植位置示意

Fig.7　Location diagram of elm planting

由图 8 可知，榆树种植在坡脚位置处对岸坡稳定性最有利。在坡脚位置种植乔木时，生态护岸相对于素土岸坡安全系数增加了 5.16%。

由图 9 可知，根系在坡脚处最接近岸坡原潜在滑动面，因此更容易阻隔滑动面在坡脚处的贯通，伴随着根系的嵌入，岸坡潜在滑动面向坡体内深层转移。在坡脚以上位置种植榆树时，随着种植位置沿坡面的上移，根系逐渐延伸不到岸坡潜在滑动面，其锚固抗滑作用将通过包裹根系的周围土体向岸坡体深处延伸、传递和影响，导致稳固效果没有种植于坡脚处明显。

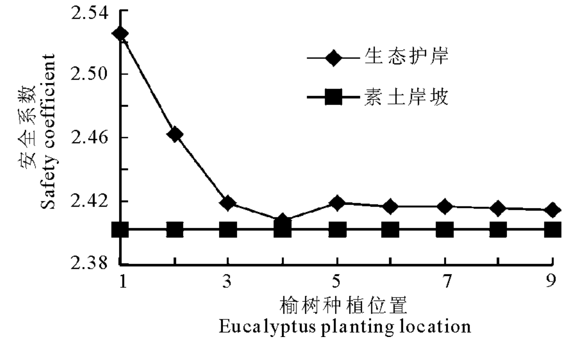
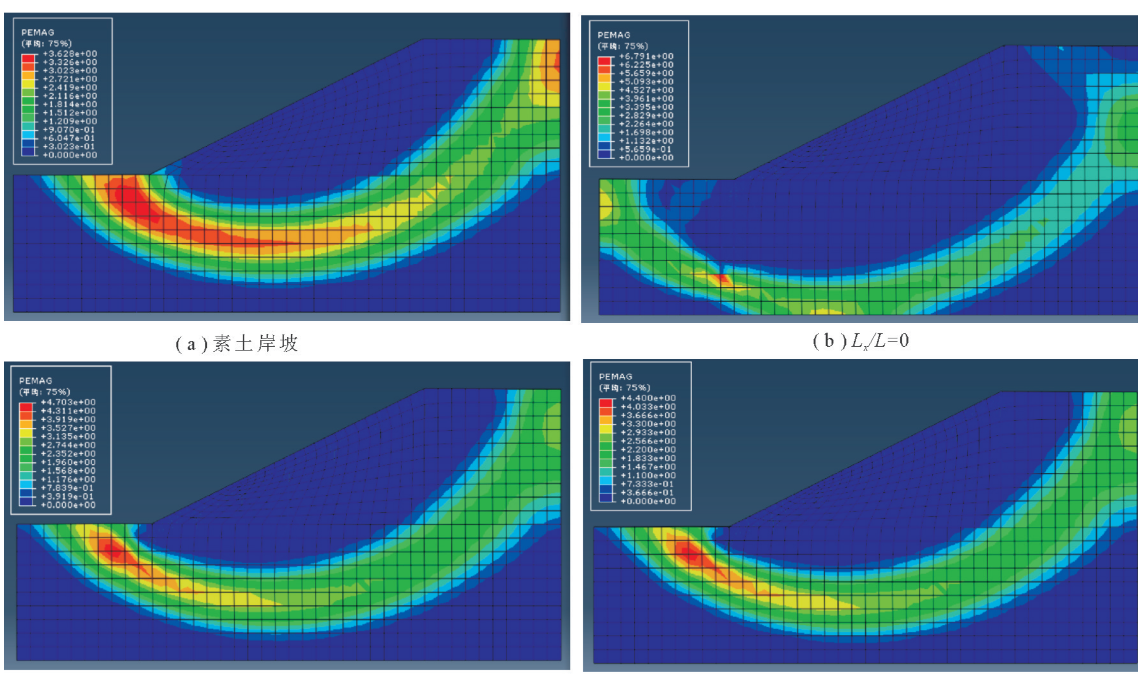


图 8　岸坡整体稳定安全系数随榆树种植位置的变化

Fig.8　Relationship between the overall stability safety coefficient of bank slope and elm location



(a) 素土岸坡　　(b) $L_x/L=0$

(c) $L_x/L=1/2$　　(d) $L_x/L=1$

图 9　不同榆树分布位置的岸坡潜在滑动面模拟

Fig.9　Potential sliding surface of bank slopes with different planting location of elms

2.3.4　水位变动对岸坡整体稳定性的影响　试验区岸坡处于滩地以上，但也难免存在水位上涨的情况，模拟水位上涨 1 m 和 2 m 两种情况下岸坡的稳定性，以确定受水位变化影响时岸坡的稳定性，岸坡整体稳定安全系数随水位变化关系如图 10。水位变动情况下的岸坡潜在滑动面变化如图 11。

由图 10 可知，随着水位上涨，4 种岸坡整体稳定性均呈现降低趋势，其中生态护岸稳定性的降低速率小于素土岸坡。当水位上涨 1 m 时，草本生态护岸、草-灌生态护岸、草-灌-乔组合生态护岸相对于素土岸坡增加的安全系数分别为 0.52%、0.88%、7.34%。水位上涨 2 m 时，3 种生态护岸相对于素土岸坡增加的安全系数分别为 0.82%、1.48%、7.87%。说明岸坡在水位影响因子作用下，乔木根系的深层锚固作用仍然比草、灌根系的浅层加筋作用更有利于岸坡整体稳定性的提升。

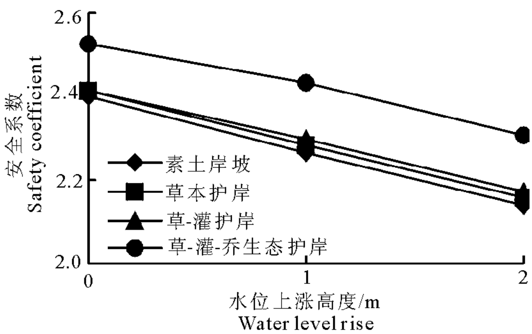
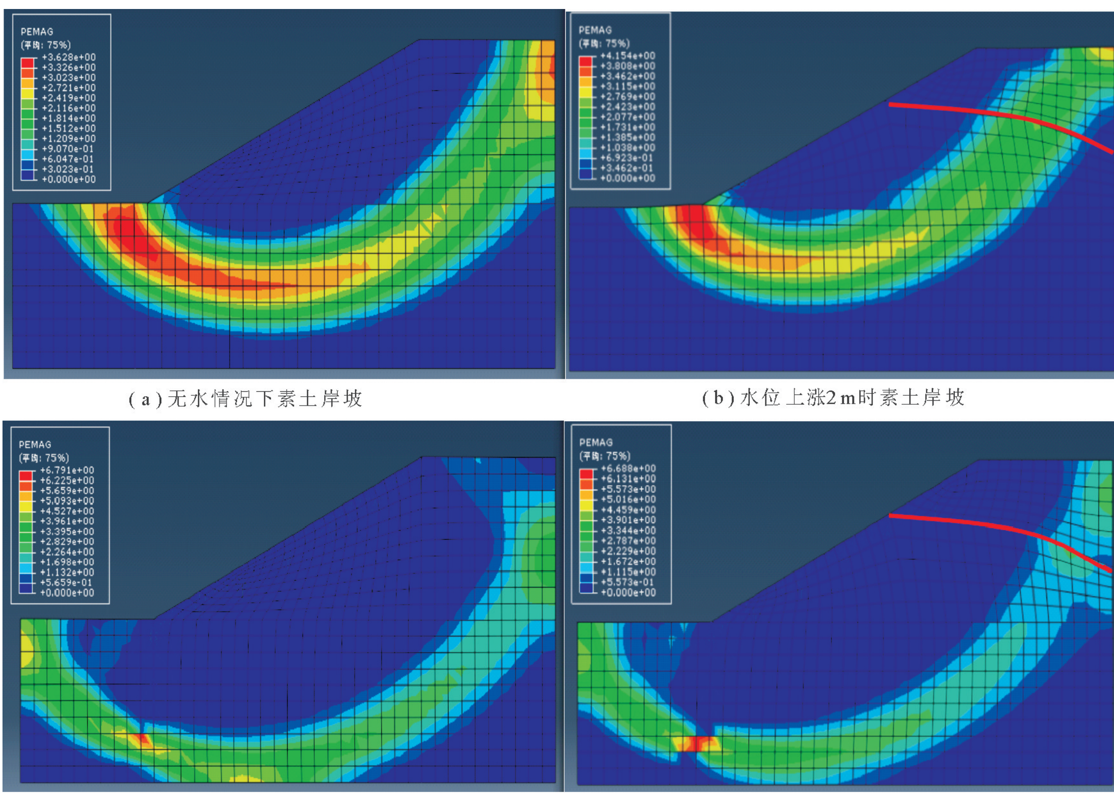


图 10　岸坡整体稳定安全系数随水位变化

Fig.10　Relationship between the overall stability safety coefficient of bank slope and water level

当岸坡受水位因子影响时，红色浸润线以下土体强度较小，岸坡潜在滑动面位置随之产生变化。由图 11 可知，素土岸坡在水位上涨 2 m 后，岸坡潜在滑动面相对无水情况时上移较明显，岸坡稳定性受到一定威胁；

而草-灌-乔生态岸坡在水位上涨2 m后，岸坡潜在滑动面相对无水情况时上移幅度较小，因为植物根系对岸坡土体的加筋锚固作用可以减弱土体强度的下降速率，所以生态岸坡抵抗水位变动影响的能力强于素土岸坡。



(a) 无水情况下素土岸坡　(b) 水位上涨2 m时素土岸坡

(c) 无水情况下草-灌-乔生态岸坡　(d) 水位上涨2 m时草-灌-乔生态岸坡

图 11　水位影响因子作用下的岸坡潜在滑动面对比

Fig.11　Potential sliding surface of bank slopes with or without the influence of water level

3　讨论

随着生态修复及可持续发展理念的不断深入，在护岸工程中，以植物作为柔性生物防护材料已被广泛采用，植物除了具备生态景观功能之外，其发达的根系系统还有一定的岸坡稳固作用。在其固岸能力方面，学者们注重于研究草本和灌木根系对岸坡土体物理特性的影响，从根系提高土体粘聚力的角度着手，采用剪切试验分别测定根-土复合体及素土的抗剪强度，发现根-土复合体的粘聚力高于素土，从而判定根系起到了加筋固岸作用（郝彤琦等2000；张飞等，2005）。由于安全系数是评判岸坡稳定性的重要性指标，本文在前人研究成果的基础上做了进一步的工作，不仅计算了狗牙根和连翘根系对于岸坡浅层土体抗剪强度及附加粘聚力的贡献值，还计算了生态加筋岸坡稳定安全系数的定量值，并对比了两种植被根系加筋作用前、后安全系数的变化，从而使人在根系稳固岸坡这一概念上有了更直观的感受和更明确的理论依据。

由于草本和灌木植被根系分布的深度和广度有限，所以固岸作用范围相对受到限制。在植被对岸坡整体稳定性影响研究中，拥有较长根系的乔木起

主导作用。对于岸坡整体稳定性安全系数的计算，有限元法模拟计算法应用较多。嵇晓雷(2013)和周群华等(2007)使用有限元方法，将根系与土体组合的根-土复合体视为一种均质材料，然后对均质材料进行安全系数求解，但此方法只在弹性范围内适用，没有考虑到土体的塑性特性。本文在数值模拟时采用分离式模型法，将植被根系和土体两种单元分开考虑，模拟过程中根系与土体分别采取各自的参数，避免了单元模型的选用不当；另外，在模拟中设定土体与根系间能够实现自动嵌入、契合和连接，更实际地反映出乔木根系对于深层岸坡土体的锚固作用，并得出更为准确的岸坡整体稳定安全系数值，可为生态护岸工程设计工作提供一定的参考。

4　小结

（1）狗牙根与连翘根系的浅层加筋固岸作用较强，当土层深度超过其根系长度时，狗牙根和连翘根系增强作用均较小，在岸坡存在浅层不稳定性滑层时，根系可深入至滑层的草本、灌木进行生态防护。

（2）乔木榆树根系较草本狗牙根和灌木连翘根系对岸坡整体稳定性提升作用较大，并且种植于坡脚处最有利于岸坡稳定性的提高，在考虑乔木种植最优位置时，应根据实际岸坡工况具体分析。

（3）随着榆树根系长度的增加，生态护岸的整体稳定性呈增强趋势；生态岸坡抵抗水位变动影响的能力强于素土岸坡，在河岸整体稳定性较差时，要种植垂直根系较长的乔木类植被进行固岸，坡面可搭配种植草、灌植被进行坡面浅层防护及景观绿化。

（4）本文在研究植物根系对岸坡稳定性时，忽略其水文效应，如植被茎叶可有效截留和减少水流入渗坡体，有利于岸坡稳定。

参考文献

卜凡杰，李小勇，2012.北京粉质粘土层土性参数概率特性[J]. 中国高新技术企业，(3)：157 - 158.

董哲仁，2013.河流生态修复[M]. 北京：中国水利水电出版社.

董哲仁，孙东亚，赵进勇，等，2014.生态水工学进展与展望[J]. 水利学报：45(12)：1419 - 1426.

郝彤琦，谢小妍，洪添胜，2000.滩涂土壤与植物根系复合体抗剪强度的试验研究[J]. 华南农业大学学报，(4)：78 - 80.

嵇晓雷，2013. 基于植被根系分布形态的生态边坡稳定性研究[D]. 南京：南京林业大学.

梁开明，章家恩，赵本良，等，2014.河流生态护岸研究进展综述[J]. 热带地理，34(1)：116 - 122，129.

刘黎明，邱卫民，许文年，等，2007.传统护坡与生态护坡比较与分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版)，29(6)：528 - 532.

彭书生，2007. 植被护坡对土质边坡浅层稳定性影响研究[D]. 武汉：中国科学院研究生院.

宋庆丰，2008. 根系固土作用及植物护坡稳定性研究[D]. 成都：西南交通大学.

吴明辉，盛建龙，张晶，2017. 抗滑桩位置对边坡稳定性影响程度的研究[J]. 化工矿物与加工，46(3)：35 - 37，42.

解明曙，1990. 林木根系固坡土力学机制研究[J]. 水土保持学报，4(3)：7 - 14.

徐则民，黄润秋，唐正光，等，2005. 植被护坡的局限性及其对深层滑坡孕育的贡献[J]. 岩石力学与工程学报，24(3)：438 - 450.

翟志雄，2013. ANSYS 边坡稳定性分析[J]. 科技论坛，21(7)：1087 - 1091.

张飞，陈静曦，陈向波，2005. 边坡生态防护中表层含根系土抗剪试验研究[J]. 土工基础，(3)：25 - 27.

张建，范媛媛，黄质宏，2008. ANSYS 在边坡稳定分析中的应用[J]. 贵州工业大学学报(自然科学出版)，37(5)：169 - 172.

张云伟，刘跃明，周跃，2002. 云南松侧根摩擦型根土粘合键的破坏机制及模型[J]. 山地学报，(5)：628 - 631.

赵进勇，魏保义，王晓峰，等，2007. 浅谈生态型护岸工程技术[J]. 广东水利水电，(6)：68 - 74.

周群华，邓卫东，2007. 植物根系固坡的有限元数值模拟分析[J]. 公路，(12)：132 - 136.

周朔，2011. 林木根系拉伸力学特性研究[D]. 北京：北京林业大学.

Bache D H，Macaskill I A，1983. Biotechnical slope protection and erosion control[J]. Landscape & Planning，10(1)：77 - 78.

Nakamura F，Jitsu M，Kameyama S，et al，2002. Changes in riparian forests in the Kushiro Mire，Japan，associated with stream channelization[J]. River Research and Applications，18(1)：65 - 79.

Odum H T，1971. Environment，power，and society[M]. New York：John Wiley & Sons.

Manbeian，T，1973.The influence of soil moisture suction，cyclic wetting and drying，and plant roots on the shear strength of a cohesive soil[D].University of California，at Berkeley，Calif.

（责任编辑　万月华）

Effect of Plant Roots on River Bank Stabilization after Composite Vegetation Planting

HAO You-zhi[1,2], ZHAO Jin-yong[1], LU Ming[3], WANG Qi[1], PENG Wen-qi[1], CHEN Zhuo[1]

(1.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100036, P.R.China;
2.Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210009, P.R.China;
3.Hebei University of Engineering, Handan 056038, P.R.China)

Abstract: The effect of roots on soil stabilization and revetment in ecological restoration is difficult to measure and control. In this investigation, exposed banks of the Lianshi Lake section of Yongding River in Beijing were chosen to study the quantitative effect of the plant root system on bank slope stability using a herb-shrub-tree pattern of vegetation. In this study, *Cynodon dactylon* (Bermuda grass) was selected as the herb, *Forsythia suspensa* (weeping forsythia) as the shrub and *Ulmus pumila* (Siberian elm) as the tree. Root system parameters measured included the morphological distribution and characteristics of the typical herbs, shrubs, and trees planted on the ecological slope. The shallow stability of the bank slope was calculated and analyzed based on the established mechanical model of root reinforcement, developed using the limit equilibrium method based on reinforcement theory. The overall stability of the river bank slope was calculated by the ABAQUS finite element model based on the strength reduction principle. Results show that root reinforcement by the herbs and shrubs improved the cohesion, shear strength and stability of the shallow soil on the river bank. The reinforcement provided by herb and shrub roots on the overall stability of the river bank was much smaller than the anchoring effect of the tree roots. The planting of trees at the foot of the slope was most beneficial to the improvement of the bank slope stability, and the safety factor of the bank slope increased by 5.16%. Tree root length was an important factor for overall bank slope stability. When the root length increased from 1 m to 3 m, the overall stability safety factor of the ecological bank slope, respectively increased by 1.25% and 14.2% compared to the bank without vegetation. Further, the enhancement effect gradually increased with root length. When the water level changed, the stability factor of the ecological bank increased by up to 7.87% compared to the bank without vegetation. Thus, the reinforcement and anchoring effect of the root system on bank soils can be better estimated by calculating the shallow and overall stability of the river bank. These results provide a reference for configuring the vegetation types during the design phase of ecological bank protection projects.

Key words: ecological revetment; vegetation root system; limit equilibrium method; finite element; bank slope stability