网络首发时间：2024-12-13 14:43:55　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20241212.1550.001

文章编号：2097-096X(2024)-00-0000-00

典型草-灌植物根径变化对生态护岸稳定性的影响

周子棚[1]，丁　洋[1,2]，薛　洋[3]，赵进勇[1,2]，陈汪洋[3]，王　琦[1,2]
(1. 中国水利水电科学研究院，北京　100038；2. 水利部京津冀水安全保障重点实验室，北京　100038；
3. 中国水务投资集团有限公司，北京　100053)

摘要：生态护岸植被根系深埋在土体中不易被观测，在生长过程中对岸坡稳定影响的研究还存在许多不足，而在根系固土的边坡稳定性模拟方面，现有研究多集中在植被的种植位置或根长变化对护岸稳定性提升多少的比较，很少有研究分析植物根径变化对护岸稳定性产生的影响。本文采用有限元强度折减法，以永定河莲石湖两岸边坡为例，通过 MIDAS 软件，建立岸坡根土复合体的有限元模型，分别以素土岸坡，不同根径下的狗牙根护岸、连翘护岸、狗牙根与连翘组合的护岸类型为研究对象，计算这四种情况下岸坡稳定安全系数和变形的最大位移量，定量分析植物根径变化对护岸稳定性的影响。结果显示，对于同类型生态护岸，稳定性随植被根径的增加而增加；对于不同生态护岸，在狗牙根护岸、连翘护岸和狗牙根-连翘的护岸中，当根径达到最大值时，岸坡稳定安全系数分别比素土岸坡提高了 11.3%、30.2%和 38.4%；岸坡变形的最大位移量分别比素土岸坡减小了 18.47%、32.6%和 40.2%。稳定性由强到弱的护岸类型为：狗牙根-连翘护岸>连翘护岸>狗牙根护岸>素土护岸。通过根径变化的不同生态护岸稳定性的分析计算，加深了植物根系固土的认识，为生态护岸工程植被的配置提供了参考依据。

关键词：生态护岸；根系直径；有限元强度折减法；根系固土；护岸稳定性
中图分类号：TV861　**文献标识码：**A　**doi：**10.13244/j.cnki.jiwhr.20240075

1　研究背景

在工程建设中，生态护岸的设计除了满足防洪安全、岸坡抗冲刷侵蚀、环境美化、休闲游憩等功能外，还要具有生态景观完整性的功能[1-3]。为了顺应生态护岸工程建设的需要，越来越多的植被加入到护岸工程的建设中。作为一种活体工程材料，植被根系在生态护岸工程中具有加筋锚固[4]、抗冲刷和侵蚀[5-7]以及营造微栖息地[8]等功能。生态护岸植被根系固土效应主要是通过植物根系在岸坡土体变形时承受拉力而限制土体位移变形，从而提高土体的抗剪强度，维护岸坡的稳定和安全[9-12]。草本植物的根系往往细密并且分布较浅，通常被认为在土体中起到了加筋作用，而灌木植物的根系比较粗而且发达，在土体中分布深度较深，通常被认为具有锚固的作用[13-15]。

生态护岸技术是未来岸坡防护技术发展的方向，已成为维护河湖生态环境的重要措施[16]。目前，在植被根系固土的稳定性数值模拟方面，学者们做了大量研究。封金财[17]使用有限元数值分析软件，发现根系长度与边坡稳定性的安全系数呈正相关关系，但当根系长度超过 3 m 时，边坡的安全系数就不再提高。这就意味着根系长度对护岸稳定性的提升具有一定的阈值，打破了传统观念认为的根系越长护岸效果越好；日本学者 Tiwari 等[18]使用数值模拟分析探究了植物根系在土壤中的分布模式对边坡稳定性安全系数的影响；游宇[19]采用 ANSYS 有限元仿真软件模拟了根系在多种条件下对土壤边坡加固的作用，结果表明植物根系的边坡表现出比素土边坡整体稳定性更强，边坡整体的形变程度更小；李雪尔等[20]对无树林覆盖的斜坡和有树林覆盖的斜坡进行了边坡稳定安全系数的计算研究，发现有树林的边坡稳定安全系数明显高于无树林边坡，安全系数高出 7%～18%左右；郝由之[21]采用极限平

收稿日期：2024-05-11
基金项目：水利部重大科技项目(SKS-2022071)；中国电力建设股份有限公司科技项目(KJ-2023-187)；中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(WE0145B042021)
作者简介：周子棚(1998-)，硕士生，主要从事河湖生态保护与修复研究。E-mail：18381677213@163.com
通信作者：赵进勇(1976-)，博士，正高级工程师，主要从事河流生态修复、生态水工学等研究。E-mail：zhaojy@iwhr.com

衡法并运用 ABAQUS 软件，分析得出草灌乔植物的根系能有效增加路堤边坡土体的抗剪强度和整体稳定性，其中乔木根系的增加效果最好，特别是在岸坡坡脚位置种植乔木能显著提高岸坡整体稳定性；邱嘉琦等[22]运用灰色关联度分析方法分析了水位变化情况下植被对岸坡的稳固效果，发现随着河道水位的降低，岸坡稳定安全系数先快速下降后趋于稳定。

不同种类的植被根系对岸坡稳定起着不同的作用，植物根系各个性状参数通过影响土体的弹性模量、黏聚力等从而对护岸加固效果各有不同。植物根系深埋在土体中不易被观测，在生长过程中对岸坡稳定影响的研究还存在许多不足，加之目前对生态护岸的边坡稳定性模拟研究主要集中在有无植被根系情况下护岸稳定性的比较[23]，或是植被的种植位置或根长变化对护岸稳定性提升多少的比较[24-26]，很少有研究分析植物根系直径变化对护岸稳定性产生的影响，这就使边坡稳定性数值模拟研究不够深入，不够细致。

因此，有必要开展植物根系性状参数，如不同直径变化对生态护岸稳定产生的影响。本研究通过 MIDAS GTS NX 岩土工程软件，采用强度折减法，建立岸坡根土复合体的有限元模型，以永定河莲石湖两岸边坡为例，分别以无植物根系的素土岸坡，不同根径下狗牙根护岸、连翘护岸、狗牙根与连翘组合型护岸为研究对象，计算这四种情况下岸坡稳定安全系数和岸坡变形的最大位移量，从而定量分析植物根径变化以及狗牙根和连翘这两种植物对护岸稳定性的影响。通过上述研究，加深植物根系固土的认识，为生态护岸工程植被的配置提供参考依据。

2　研究方法

2.1　MIDAS 软件简介　MIDAS GTS NX 是专门针对岩土类工程进行有限元分析计算的岩土工程模拟软件。它针对岩土工程领域可能发生的问题设置了多种解决方式，并且集成了现代图形用户界面(GUI)和先进的分析能力，使研究者能够进行复杂的地下工程、岩土结构、边坡稳定、基础设施设计和分析。本研究采用 MIDAS GTS NX 有限元软件中的莫尔-库伦弹塑性的本构模型分析计算河道岸坡稳定性。

2.2　安全系数方法确定　主要有两种计算方法：强度折减法和极限平衡法。强度折减法与极限平衡法相比，能展现出更加严谨和细致的算法体系。将强度折减法应用在岸坡的稳定分析，优势在于：

(1)能够考虑岸坡土体的结构性质及其变形后对应力分布的影响；

(2)相比于极限平衡法，更能适用多样的地理环境，面对复杂地质条件的岸坡也可分析计算；

(3)无需对滑移面形状进行假设便可直接计算岸坡土体的安全稳定系数。

基于上述优势，本文选择强度折减法计算安全系数。

有限元强度折减法的基本原理是计算出一个强度折减系数 F_r，通过土体的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 同时除以相同的 F_r 值得到一组新的 c_r 和 φ_r，从而逐步降低土体的抗剪强度参数。每进行一次强度折减，都会重新进行有限元计算，当强度折减系数达到某一值使土体出现滑移面时，边坡就达到明显的失稳破坏状态，此时的强度折减系数就是临界强度折减系数 F'_r，其倒数即为边坡土体的稳定安全系数 Fos。计算公式如下：

$$F_r = \frac{c}{c_r} = \frac{tan\varphi}{tan\varphi_r} \tag{1}$$

$$Fos = 1/F'_r \tag{2}$$

式中：F_r 表示强度折减系数；c、φ 表示折减前的土体黏聚力和内摩擦角；c_r、φ_r 表示折减后的土体黏聚力和内摩擦角。

判断边坡达到临界破坏状态的标准主要包括以下几种：

(1)数值计算的收敛性。当计算结果不收敛时，说明土体的所发挥的最大应力小于外荷载作用下土体产生的应变，此时土体会发生破坏。

(2)观察边坡土体内是否出现塑性区域。当边坡内部出现塑性区域时，表明土体已经接近临界破坏状态；当塑性区域逐渐发展并贯穿整个边坡时，说明边坡已经达到破坏状态。

(3)选取边坡监测点，观察其位移变化情况。当监测点的位移达到一定阈值或突然急剧增加时，表明边坡发生失稳，土体达到破坏状态。

3 计算模型

3.1 根土模型计算模块选取 在模型的建立过程中，需要选择合适的根土复合体数值模拟计算模式，用以考虑岸坡土体与根系间的相互作用机制，主要有两个思路：

(1)均质材料法。该方法是把根土复合体视作单一均匀材料处理，基于复合材料理论，忽略根与土之间接触面的影响，以简化有限元求解过程，从而更快获得计算结果[27]。这种方法将复杂的根土系统简化为一个各向同性的体系，其主要优点在于通过省略单元间接触面的考虑，降低了模型复杂度和计算时间消耗，但是此方法的简化措施与植物根系在岸坡上生长的实际情况存在一定的偏差，因此更多用于一种趋势性的判断。

(2)接触单元法。接触单元法是引入接触单元来模拟根与土的相互作用，其作用效果与岸坡土体和土体中锚杆之间相互作用相似。该方法将模型细化为根与土的接触单元、岸坡土体单元和根系单元这三个部分，在模拟时分别输入岸坡土体和根系的相关参数，中间利用接触单元进行连接，形成一种接触型的计算模型。然而，该方法存在一定的缺陷，模型考虑了更细致的单元模块，使得计算量大大增加，计算时间也较长。

基于植被根系对岸坡土体的加筋锚固作用不能被忽视，所以本文在计算根土作用时，选用接触单元法。

3.2 土体本构模型基本原理 在荷载作用下，土体的受力特性不容易精确描述。为了刻画土体的各类力学属性，许多学者研究出了能够反映出土体应力与应变特性关系的本构模型，如非线性弹性模型[28]、莫尔-库伦模型[29]、邓肯-张双曲线模型[30]、修正剑桥-黏土模型[31]等，本研究采用岩土类工程边坡稳定性分析常用的莫尔-库伦模型。

莫尔-库伦理论的强度屈服准则表达式如下：

$$\tau = c + \sigma \tan\varphi \tag{3}$$

式中：σ 表示作用在土体上剪切面上的正应力；τ 表示土体剪切强度；c 表示土体黏聚力；φ 表示土体内摩擦角。

莫尔-库伦模型的屈服面函数为：

$$F = R_{mc} - p\tan\delta - c = 0 \tag{4}$$

式中：F 是屈服函数，表示土体应力状态下的屈服条件；p 表示应力面上的法向应力；δ 表示应力面上莫尔-库伦屈服面的倾斜角，与土体的内摩擦角有关；R_{mc} 表示屈服面的平面形状，它可以通过下式计算出：

$$R_{mc} = \frac{1}{\sqrt{3}\cos\varphi}\sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{3}\cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)\tan\varphi \tag{5}$$

式中 θ 表示极偏角。

3.3 岸坡计算剖面、网格划分及边界条件设置 本文以华北平原永定河莲石湖段两岸护坡为例，通过二维平面有限元应变模型对灌草植被根系的固土作用进行模拟，草本植物选取狗牙根，灌木植物选取连翘，分析不同根系直径情况下草本、灌木以及灌草组合的根土复合体边坡的稳定性。设计岸坡坡比为 1∶2，顶宽 4 m，高 3 m，模型高 5 m，边坡土体由粉质黏土组成，相关参数如表 1 所示；模型结构尺寸如图 1 所示；岸坡有限元网格划分如图 2 所示。在有限元模型的约束中，左右两侧边界采用水平方向的约束，底面采用水平和竖直的双向约束。

表 1 岸坡土体模型参数

Table 1 Model parameters of bank slope soil

材质	重度/(KN/m^3)	弹性模量/(MPa)	泊松比	黏聚力/(kPa)	内摩擦角/°
粉质黏土	17.80	13.80	0.45	9.05	15.95

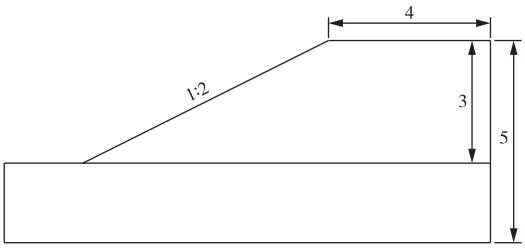


图 1　岸坡模型结构尺寸图(单位：m)

Fig.1　Structure size diagram of bank slope model (unit: m)

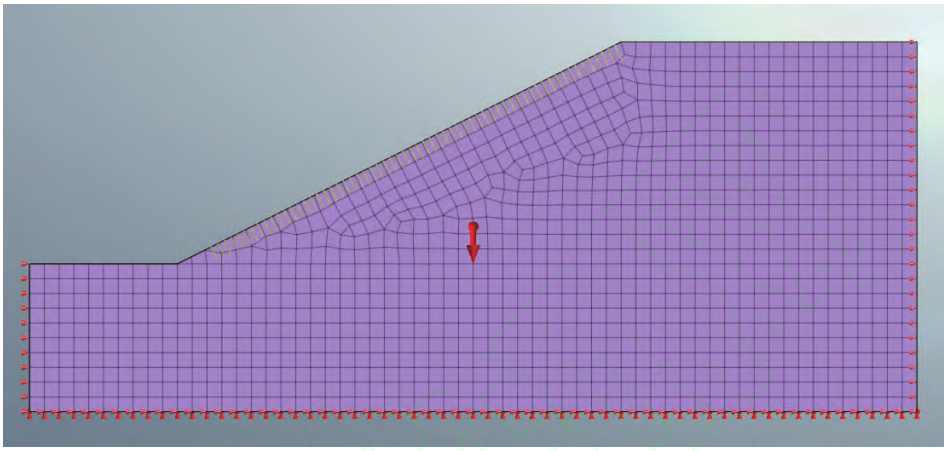


图 2　岸坡土体有限元模型网格划分

Fig.2　Grid division of finite element model of bank slope soil

3.4　根系单元模型耦合　在根系的性状研究分析中，岸坡上狗牙根植物种植密度约为 15~25 棵/100 cm^2，生长时间为 15 d；连翘根系间隔 1 m 种植，生长时间为 45 d。本研究建立的护岸稳定性分析模型是在根系性状研究的基础上进行的，在 MIDAS 有限元软件中，设置狗牙根的根长为生长天数 15 d 所对应的长度 12 cm，设置连翘的根长为生长天数 45 d 所对应的长度 50 cm，以此建立护岸稳定性分析模型实现了动态分析过程。

从根系性状的研究分析所建立的三维生长模型可以看出，岸坡上生长的狗牙根根系和连翘根系呈不规则性状，在有限元分析软件中，完全根据实际情况建立根系单元模型是一件非常困难的事情。因此，本研究在进行护岸稳定性分析时对根系进行概化处理，通过加权平均算法，将不规则的狗牙根根系性状和连翘根系性状概化为独立的单根，概化后单根的根长和根直径是原来根系根长和根直径的加权平均值，以代表根系在土体中的原始状态。在模型中，将概化后的根系设置为一根受拉杆件，采用弹性本构模型，设置其生长方向为垂直于岸坡坡面的方向。连翘根系的弹性模量在试验中已经得出，对不同直径下的弹性模量算出平均值为 $E=114.21$ MPa，输入到有限元软件中，泊松比 $\mu=0.25$；狗牙根根系的弹性模量通过查阅资料可设置为 245.95 MPa[32]，泊松比 μ 设置为 0.25，其余参数如表 2 所示。

表 2　岸坡根系模型参数

Table 2　Root model parameters of bank slope

材质	重度/(KN/m^3)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	根长/cm
狗牙根根系	15.60	245.95	0.25	25.730	45.58	12.00
连翘根系	19.20	114.21	0.25	12.628	34.41	50.00

在 MIDAS 软件中，设置根系与土的接触面为接触单元类型，摩擦系数为 0.45。

4　计算方案

4.1　素土岸坡稳定性分析　素土岸坡土体变形最大位移云图如图 3 所示，图中图例表示位移总量，色柱和旁边的百分数代表节点处位移量所占总位移量的百分比；百分数旁边的科学计数法的数值代表各节点的位移量，以下的位移云图的图例含义相同。在自重荷载下素土岸坡土体的安全系数为 1.72，岸坡变形的最大位移为 31.4 mm。

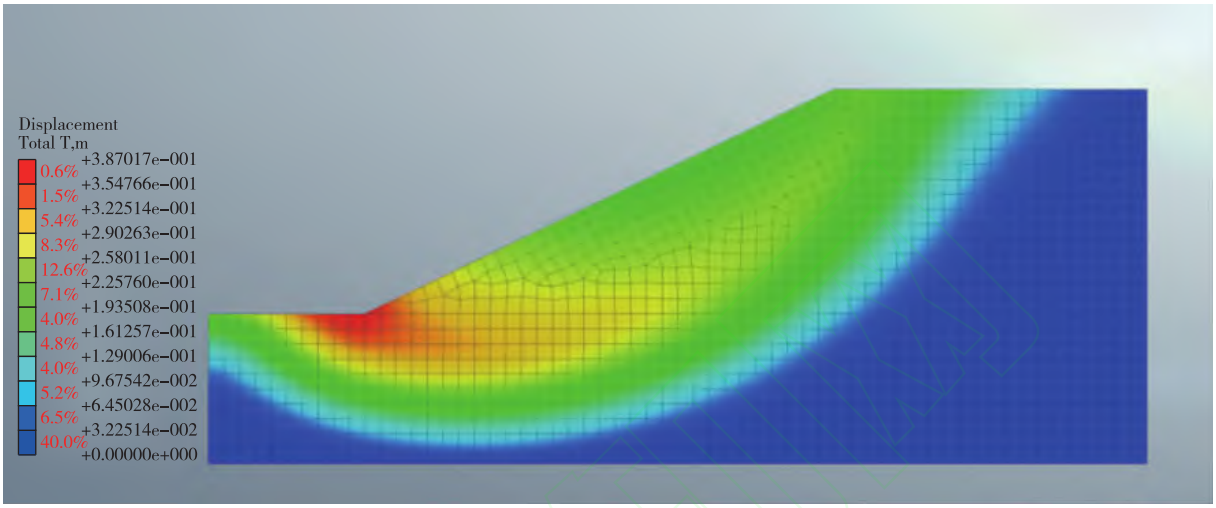
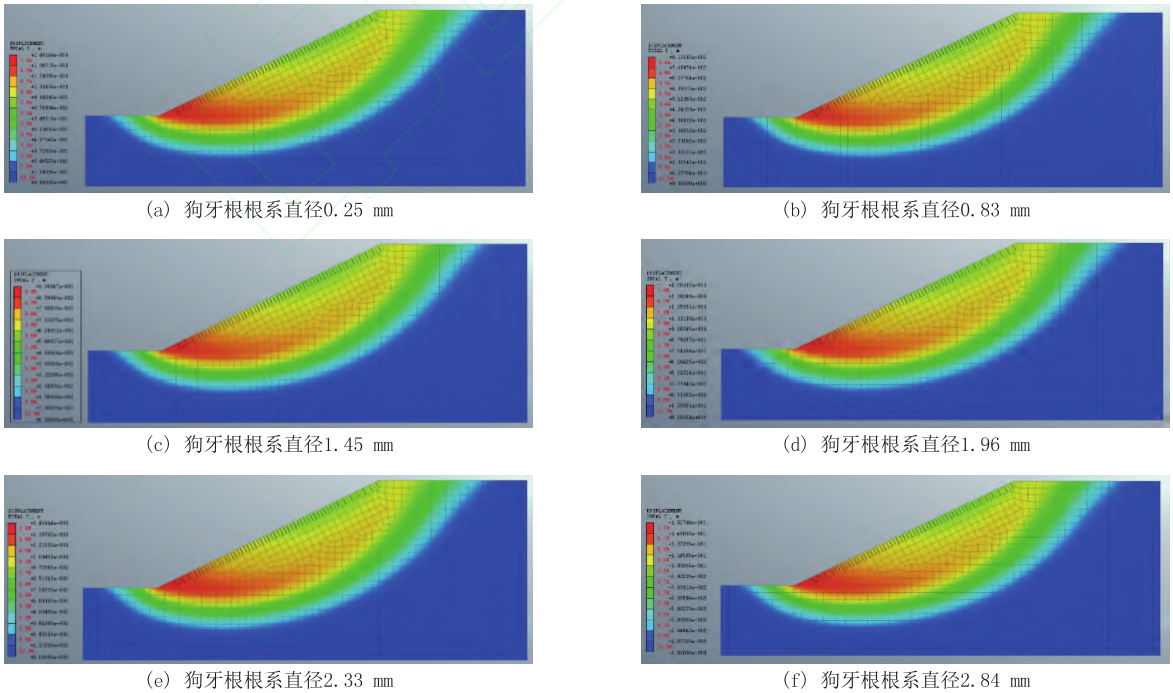


图 3　素土岸坡位移云图

Fig.3　Rootless bank slope displacement cloud chart

4.2　草本植物狗牙根不同直径岸坡浅层稳定性的影响　在 MIDAS 有限元软件中设置狗牙根植株的种植间距为 0.1 m，根系长度为 12 cm。在网格属性中，根系截面为实心圆形，在界面中设置草本植物狗牙根根系直径为 0.25 mm、0.83 mm、1.45 mm、1.96 mm、2.33 mm、2.84 mm，分析狗牙根护坡不同根径下的浅层稳定性变化，各直径下岸坡土体最大位移如图 4 所示。



(a) 狗牙根根系直径0.25 mm　(b) 狗牙根根系直径0.83 mm

(c) 狗牙根根系直径1.45 mm　(d) 狗牙根根系直径1.96 mm

(e) 狗牙根根系直径2.33 mm　(f) 狗牙根根系直径2.84 mm

图 4　狗牙根岸坡不同根系直径下的位移云图

Fig.4　The displacement nephogram of *Cynodon dactylon* bank slope under different root diameter

模拟得到的岸坡稳定安全系数结果如表 3 所示，狗牙根根系的直径与稳定性关系如图 5 和图 6 所示。

从上面的图表可以看出，植物根径的变化会影响护岸的稳定性。岸坡稳定安全系数随着草本植物狗牙根根系直径的增加而增加，而岸坡变形最大位移量随根系的增加而减小，当根系直径为 2.84 mm 时，岸坡浅层稳定安全系数为 1.914，比无植物根系的素土岸坡提高了 11.3%；此时岸坡变形的最大位移量为 25.6 mm，比无植物根系的素土岸坡减小了 18.47%。因此可以得出，草本植物根系直径越大，护岸稳定性越强。

表 3　狗牙根根系不同直径下岸坡浅层稳定安全系数和岸坡最大位移

Table 3　Safety factor of shallow slope stability and max displacement of bank slope under different diameters of *Cynodon dactylon* roots

根系直径/mm	安全系数	边坡最大位移/mm
0.25	1.754	29.6
0.83	1.773	28.7
1.45	1.787	28.2
1.96	1.823	27.4
2.33	1.872	26.3
2.84	1.914	25.6

4.3　灌木植物连翘不同直径对岸坡整体稳定性的影响　在 MIDAS 软件中设置连翘植株的种植间距为 1 m，根系长度为 50 cm。在网格属性中，根系截面为实心圆形，在界面中设置连翘根系直径为 1.63 mm、2.12 mm、2.50 mm、3.04 mm、3.56 mm、4.10 mm，分析连翘护坡不同根径下的整体稳定性变化，各直径下岸坡土体最大位移如下图 7 所示。

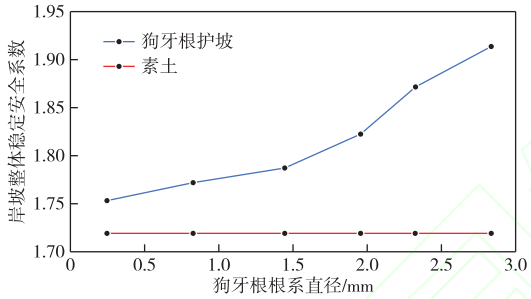


图 5　岸坡浅层稳定性随狗牙根根系直径变化关系图

Fig.5　The relationship between the stability of shallow slope and the diameter of *Cynodon dactylon* root system

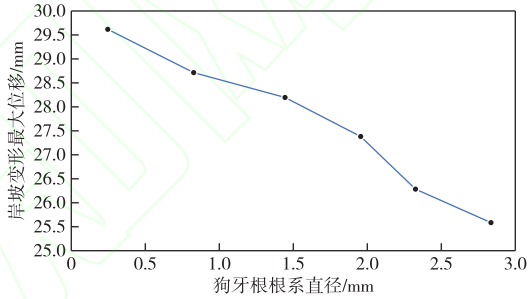
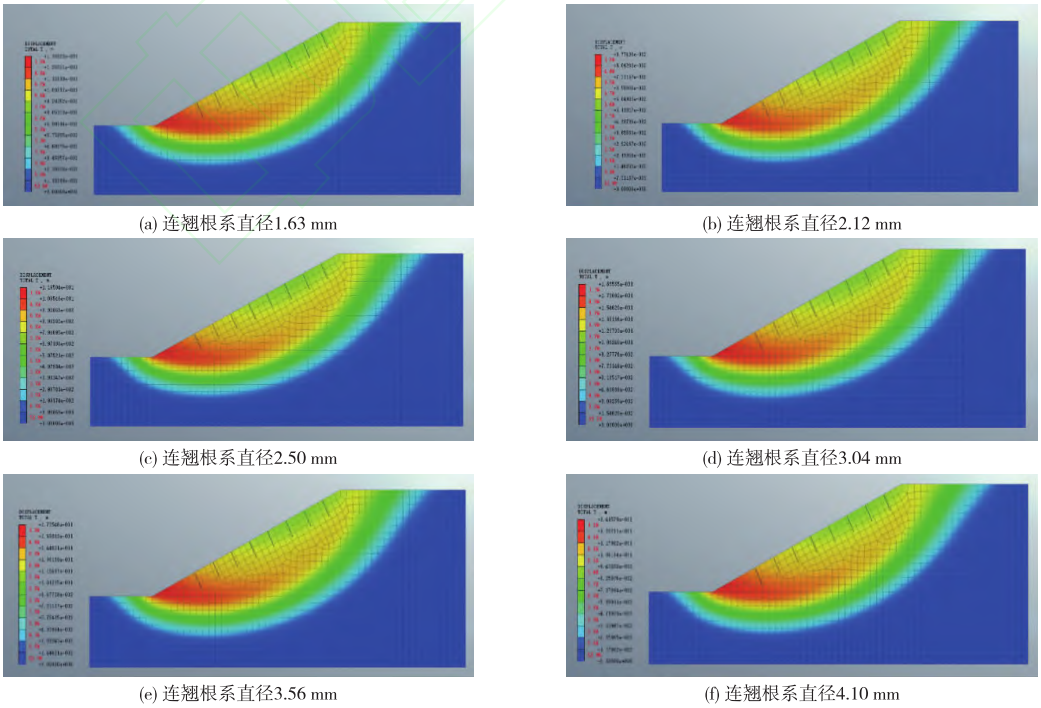


图 6　狗牙根根系系列直径下的岸坡变形最大位移

Fig.6　The max displacement of bank slope deformation under the series diameter of *Cynodon dactylon* root system



(a) 连翘根系直径1.63 mm　(b) 连翘根系直径2.12 mm

(c) 连翘根系直径2.50 mm　(d) 连翘根系直径3.04 mm

(e) 连翘根系直径3.56 mm　(f) 连翘根系直径4.10 mm

图 7　连翘岸坡不同根系直径下的位移云图

Fig.7　The displacement cloud diagram of *Weeping forsythia* bank slope under different root diameters

模拟得到的岸坡稳定安全系数结果如表 4 所示，连翘根系的直径与稳定性关系如图 8 和图 9 所示。

由上面图表可以看出，连翘护坡能显著提高护岸整体稳定性。随着连翘根系直径的增加，岸坡整体稳定安全系数持续提高，岸坡变形最大位移量不断减小，当连翘根系直径为 4.10 mm 时，岸坡整体稳定安全系数为 2.24，比无植物根系的素土岸坡提高了 30.2%；此时岸坡变形的最大位移量为 22.5 mm，比无植物根系的素土岸坡减小了 32.6%。结合狗牙根护坡安全稳定的结果，可以得出护岸整体稳定性随植物根系的增大而增大，且当护岸形式为连翘护坡时，护岸稳定性会随根系的增加而显著提升。

表 4　连翘根系系列直径下岸坡整体安全系数和岸坡变形最大位移

Table 4　The overall safety factor of the bank slope and the max displacement of bank slope deformation under the diameters of *Weeping forsythia* root system series

根系直径/mm	安全系数	边坡最大位移/mm
1.63	1.821	28.9
2.12	1.932	26.4
2.50	2.064	25.1
3.04	2.135	24.4
3.56	2.192	23.2
4.10	2.243	22.5

4.4　灌草植物搭配情况下不同根系直径对岸坡整体稳定性的影响　上面研究分析计算了单个植物根系直径变化情况下，护岸稳定性的情况。在生态护岸工程设计中，有时为了防止洪水暴雨或干旱干燥等极端环境情况，更好的提高岸坡土壤抗冲刷和抗侵蚀能力，需要多种植物相搭配，以更好的维护护岸的整体稳定性。在 MIDAS 软件中对狗牙根根系和连翘根系的系列设置与之前相同，种植间距狗牙根根系为 0.1 m，连翘为 1 m，各直径下岸坡土体最大位移云图如图 10 所示。

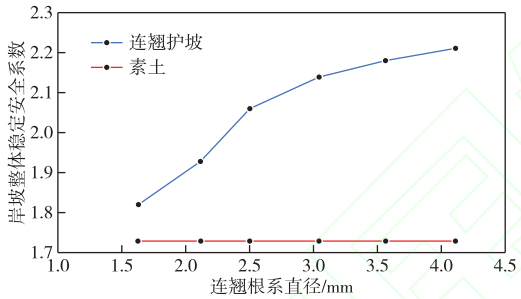


图 8　岸坡整体稳定性随连翘根系直径变化关系图

Fig.8　The relationship between the overall stability of the bank slope and the diameter of the *Weeping forsythia* root system

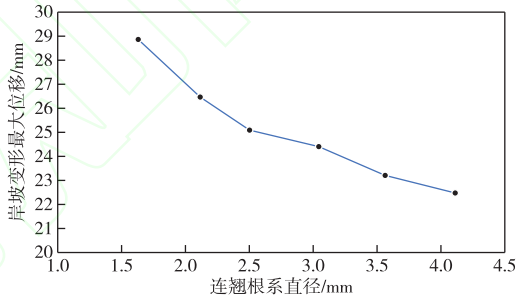


图 9　连翘根系系列直径下的岸坡变形最大位移

Fig.9　The max displacement of bank slope deformation under the series diameter of *Weeping forsythia* root system

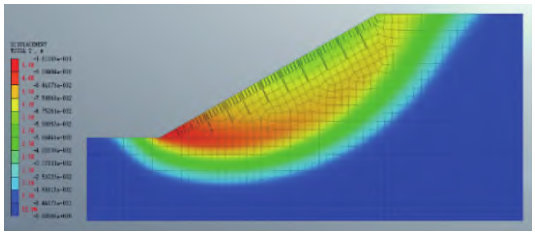
数值模拟得到的岸坡稳定安全系数结果如表 5 所示，狗牙根根系与连翘根系的直径与稳定性的关系如图 11 和图 12 所示。

随着灌木植物连翘和草本植物狗牙根根系直径的增加，岸坡整体稳定安全系数持续提高，岸坡变形最大位移量不断减小，当连翘根系直径为 4.10 mm、狗牙根根系直径为 2.84 mm 时，岸坡整体稳定安全系数为 2.381，比无植物根系的素土岸坡提高了 38.4%；此时岸坡变形的最大位移量为 11.7 mm，比无植物根系的素土岸坡减小了 40.2%。结合狗牙根岸坡和连翘岸坡安全稳定的结果，可以得出狗牙根与连翘相搭配的岸坡型式最为稳定。

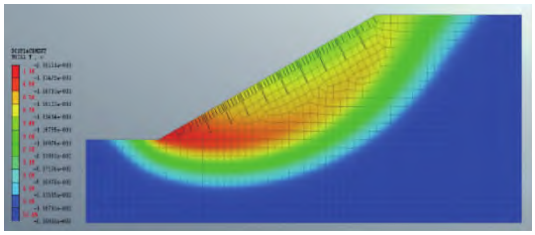
5　结论

通过 MIDAS GTS NX 岩土工程软件，采用强度折减法计算岸坡整体稳定性的安全系数，模拟草本植物还有灌木植物不同根系直径变化的护岸边坡稳定情况。得到的结论如下：

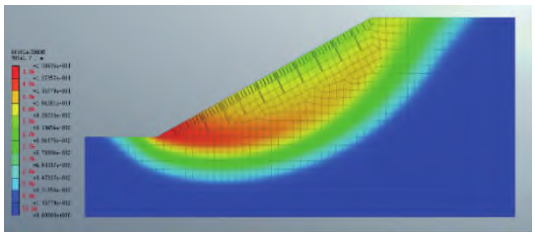
(1)与无植物根系加固的素土岸坡相比，有狗牙根植被或连翘植被护岸的岸坡稳定性得到了较大改善。在狗牙根护岸中，当根系直径达到最大值 2.84 mm 时，安全系数比无根系的素体岸坡提高了 11.30%，岸坡变形的最大位移量减小了 18.47%；在连翘护岸中，当根系直径达到最大值 4.10 mm 时，岸坡整体稳定安全系数比无植物根系的素土岸坡提高了 30.2%，岸坡变形的最大位移量减小了 32.6%；



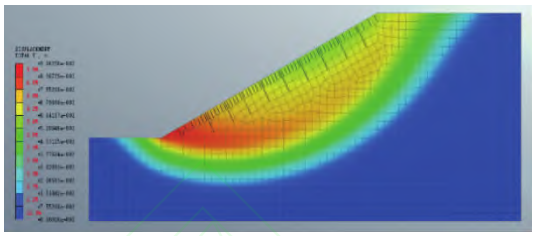
(a) 狗牙根根系直径0.25 mm
连翘根系直径1.63 mm



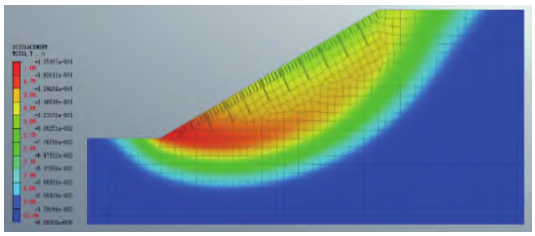
(b) 狗牙根根系直径0.83 mm
连翘根系直径2.12 mm



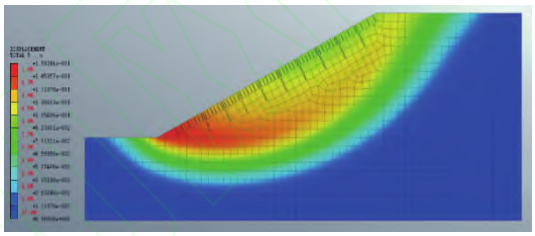
(c) 狗牙根根系直径1.45 mm
连翘根系直径2.50 mm



(d) 狗牙根根系直径1.96 mm
连翘根系直径3.04 mm



(e) 狗牙根根系直径2.33 mm
连翘根系直径3.56 mm



(f) 狗牙根根系直径2.84 mm
连翘根系直径4.10 mm

图 10　不同根系直径下“狗牙根-连翘”植物搭配岸坡最大位移云图

Fig.10　The maximum displacement cloud diagram of “*Cynodon dactylon*-*Weeping forsythia*” plant with bank slope under different root diameters

表 5　狗牙根系与连翘根系不同直径下岸坡整体安全系数和变形最大位移

Table 5　The overall safety factor and the maximum deformation displacement of the bank slope under different diameters of *Cynodon dactylon* root system and *Weeping forsythia* root system

狗牙根根系直径/mm	连翘根系直径/mm	安全系数	边坡最大位移/mm
0.25	1.63	1.843	27.4
0.83	2.12	1.985	25.9
1.45	2.50	2.157	23.5
1.96	3.04	2.239	22.2
2.33	3.56	2.342	19.8
2.84	4.10	2.381	18.7

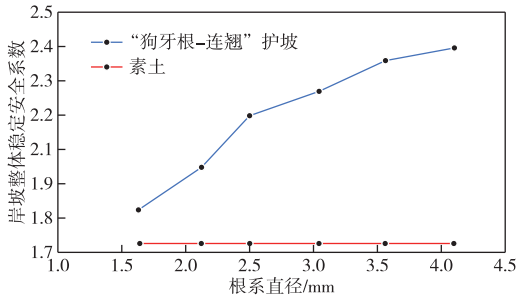


图 11　狗牙根-连翘护坡整体稳定性随根系直径变化关系图

Fig.11　The relationship between the overall stability of *Cynodon dactylon*-*Weeping forsythia* slope protection and root diameter

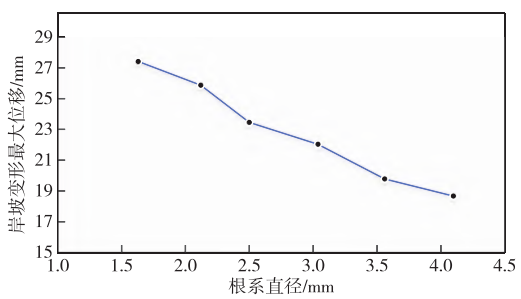


图 12　不同根系直径下狗牙根-连翘护坡岸坡变形最大位移

Fig.12　The maximum deformation displacement of *Cynodon dactylon*-*Weeping forsythia* slope revetment slope under different root diameters

在狗牙根-连翘的生态护岸中，当连翘根系直径为 4.10 mm、狗牙根根系直径为 2.84 mm 时，岸坡整体稳定安全系数比素土岸坡提高了 38.4%，岸坡变形的最大位移量减小了 40.2%。

(2)对于相同的护岸类型，岸坡稳定安全系数随着植物根系直径的增加而增加，岸坡变形最大位移量随根系直径的增加而减小。在狗牙根护岸中，当狗牙根根系直径为 0.25 mm、1.45 mm、2.84 mm 时，岸坡浅层稳定安全系数分别为 1.754、1.787、1.914，岸坡变形的最大位移量分别为 29.6 mm、28.2 mm、25.6 mm。在连翘护岸中，当连翘根系直径为 1.63 mm、2.50 mm、4.10 mm 时，岸坡整体稳定安全系数分别为 1.821、2.064、2.243，岸坡变形的最大位移量分别为 28.9 mm、25.1 mm、22.5 mm。在狗牙根-连翘护岸中，当狗牙根根系直径为 0.25 mm、连翘根径为 1.63 mm 时，岸坡整体稳定安全系数为 1.843，岸坡变形最大位移量为 27.4 mm；当狗牙根根系直径为 1.45 mm、连翘根径为 2.50 mm 时，岸坡整体稳定安全系数为 2.157，岸坡变形最大位移量为 23.5 mm；当狗牙根根系直径为 2.84 mm、连翘根径为 4.10 mm 时，岸坡整体稳定安全系数为 2.381，岸坡变形最大位移量为 18.7 mm。

(3)综合比较根系固土的效果，可以得出，稳定性由强到弱的护岸类型为：狗牙根-连翘护岸>连翘护岸>狗牙根护岸>素土护岸，植被根径的增加能提高护岸边坡的稳定性，草本植物狗牙根在岸坡土体中只起到浅层加筋作用，灌木植物连翘可以在岸坡土体中起到锚固作用，当这两种植物搭配使用时，护岸效果达到最好。

参 考 文 献：

[1] 董哲仁，孙东亚，赵进勇，等. 生态水工学进展与展望[J]. 水利学报，2014，45(12)：1419-1426.(DONG Zheren，SUN Dongya，ZHAO Jinyong，et al. Progress and prospect of eco-hydraulic engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2014，45(12)：1419-1426.(in Chinese))

[2] 董哲仁. 生态水利工程原理与技术. 北京：中国水利水电出版社，2007.(DONG Zheren. Principles and Technologies of Eco-Hydraulic Engineering[M]. Beijing：China Water & Power Press，2007.(in Chinese))

[3] 闫建梅，卢阳，石劲松，等. 生态护岸技术与效益综合评价研究进展[J]. 三峡生态环境监测，2022，7(4)：56-67.(YAN Jianmei，LU Yang，SHI Jinsong，et al. Ecological bank protection technology and its benefit evaluation[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges，2022，7(4)：56-67.(in Chinese))

[4] FERREIRA O，HOLANDA F，PEDROTTI A，et al. Root system of jatropha curcas provides resistance and strengthens to the soil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis，2022，53(22)：2955-2967.

[5] 唐瑞泽，汤骅，宗全利，等. 植被根系对干旱内陆河流岸坡冲刷过程影响的模拟研究[J]. 水土保持学报，2023，37(2)：27-36.(TANG Ruize，TANG Hua，ZONG Quanli，et al. Simulation study on the effect of vegetation root systems on the scour process of river bank slope in arid inland[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2023，37(2)：27-36.(in Chinese))

[6] 王伟杰，赵进勇，冯达骞，等. 基于植被粗糙度的生态渠道阻力系数研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文)，2023，21(6)：519-525.(WANG Weijie，ZHAO Jinyong，FENG Daqian，et al. Study on resistance coefficient of ecological channel based on vegetation roughness[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2023，21(6)：519-525.(in Chinese))

[7] 宗全利，张禹洋，唐瑞泽，等. 塔里木河植被根系对河岸冲刷特性影响的现场试验[J]. 水科学进展，2024，35(2)：232-243.(ZONG Quanli，ZHANG Yuyang，TANG Ruize，et al. Field experiment on the influence of vegetation roots on riverbank erosion characteristics in the Tarim River.[J]. Advances in Water Science，2024，35(2)：232-243.(in Chinese))

[8] 纪羽，袁帅，付和平，等. 草原鼢鼠土丘与不同根系类型植物的关系[J]. 兽类学报，2019，39(2)：162-171.(JI YU，YUAN Shuai，FU Heping，et al. The relationships between the mounds of transbaikal zokor and plants with different root types[J]. Acta Theriologica Sinica，2019，39(2)：162-171.(in Chinese))

[9] STOKES A，ATGER C，BENGOUGH A G，et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides[J]. Plant and Soil，2009，324(1/2)：1-30.

[10] SAADATI N，MOSADDEGHI M，SABZALIAN M，et al. Soil mechanical reinforcement by the fibrous roots of se-

lected rangeland plants using a large soil-root shear apparatus[J]. Soil & Tillage Research, 2023, 234: 13.

[11] GONZALEZ O A. Sustainable use of nature-based solutions for slope protection and erosion control[J]. Sustainability, 2022, 14(4): 3.

[12] TROEGER D, BRAUN A C, EICHEL J, et al. Pinus plantations impact hillslope stability and decrease landscape resilience by changing biogeomorphic feedbacks in Chile[J]. Catena, 2022, 216: 20.

[13] 陈飞, 施康, 钱乾, 等. 根土复合体材料的抗剪强度特性研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(6): 96-104. (CHEN Fei, SHI Kang, QIAN Qian, et al. Research progress on shear strength characteristics of root soil composite materials[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2021, 12(6): 96-104. (in Chinese))

[14] 谢祥荣, 陈正发, 朱贞彦, 等. 根土复合体力学效应及其模型构建研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 13-28, 196. (XIE Xiangrong, CHEN Zhengfa, ZHU Zhenyan, et al. Research progress and prospect of mechanical effects and model construction of root-soil complex[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 13-28, 196. (in Chinese))

[15] 海龙, 谭世林, 徐博. 紫花苜蓿和通奶草根土复合体的力学特性[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 57-64. (HAI Long, TAN Shilin, XU Bo. Mechanical properties of *Medicago Sativa* and *Euphorbia Hypericifolia* root-soil complex[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 57-64. (in Chinese))

[16] 巢路, 何伟, 关许为. 长江口和杭州湾北岸生态保滩促淤护岸工程设计与应用研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 6(6): 571-577. (CHAO Lu, HE Wei, GUAN Xuwei. Research on design and application of a new type of ecological embankment to coast protection and siltation promotion in the North Part of Hangzhou Bay and Yangtze River Estuary[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 6(6): 571-577. (in Chinese))

[17] 封金财. 植物根系对边坡的加固作用模拟分析[J]. 江苏工业学院学报, 2005(3): 27-29. (FENG Jincai. Analogue analysis of roots reinforcement to the slope stability[J]. Journal of Changzhou University(Natural Science Edition), 2005, (3): 27-29. (in Chinese))

[18] TIWARI R C, BHANDARY N P, YATABE R, et al. New numerical scheme in the finite-element method for evaluating the root-reinforcement effect on soil slope stability[J]. Geotechnique, 2013, 63(2): 129-139.

[19] 游宇. 高寒山区植物根系固化边坡机理分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017. (YOU Yu. Mechanism Analysis of Plant Roots Slope Reinforcement in Alpine Mountain[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese))

[20] 李雪尔, 谢春燕, 李岩, 等. 植物根系护坡的有限元数值分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(2): 76-82. (LI Xueer, XIE Chunyan, LI Yan, et al. On finite element analysis of slope protection based on plant roots[J]. Artificial Intelligence Science and Engineering, 2018, 43(2): 76-82. (in Chinese))

[21] 郝由之. 考虑复合植被根系加筋锚固作用的坡式生态护岸稳定性研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019. (HAO Youzhi. Study on Stability of Slope Ecological Revetment Considering Reinforced Anchorage of Composite Vegetation Roots[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019. (in Chinese))

[22] 邱嘉琦, 余明辉, 李倩. 水位变化条件下植被对下荆江河段岸坡稳定性影响分析[J]. 水利学报, 2024, 55(1): 60-70. (QIU Jiaqi, YU Minghui, LI Qian. Analysis of the influence of vegetation on the riverbank stability in the Lower Jingjiang Reach under water level change[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(1): 60-70. (in Chinese))

[23] TANG V T, FU D F, BINH T N, et al. An investigation on performance and structure of ecological revetment in a sub-tropical area: A case study on Cuatien River, Vinh City, Vietnam[J]. Water, 2018, 10(5): 18.

[24] 王晶. 漓江水陆交错带生态修复体系构建研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016. (WANG Jing. Study on Construction of Ecological Rehabilitation System in Aquatic-terrestrial Ecotone Lijiang River[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016. (in Chinese))

[25] 郝由之, 赵进勇, 路明, 等. 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, 2020, 41(3): 42-50. (HAO Youzhi, ZHAO Jinyong, LU Ming, et al. Effect of plant roots on river bank stabilization after composite vegetation planting[J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(3): 42-50. (in Chinese))

[26] 陈静. 寒区乡村河流生态修复工程的生态环境效应及效果评价研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2024. (CHEN Jin. Study on Eco-environmental Response and Effect Evaluation of Rural River Restoration Project in Cold

Area-A case Study of Huaide River at the Reaches of the Dongliao River[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2024. (in Chinese))

[27] VAN D V N, KLERK W J, PETERS D J, et al. Estimating the effect of assumed initial damage to the hydraulic stability of pattern-placed revetments on dikes using finite element modeling[J]. Coastal Engineering, 2024, 189: 18.

[28] GAJO A, BIGONI D. A model for stress and plastic strain induced nonlinear, hyperelastic anisotropy in soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008, 32(7): 833-861.

[29] SUN D A, YAO Y P, MATSUOKA H. Modification of critical state models by Mohr-Coulomb criterion[J]. Mechanics Research Communications, 2006, 33(2): 217-232.

[30] 岳建伟, 宋达, 杨光辉, 等. 黄泛区粉砂土 Duncan-Chang 双曲线模型参数确定[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2017, 47(6): 733-738. (YUE Jianwei, SONG Da, YANG Guanghui, et al. Determination of Duncan-Chang hyperbolic model parameter of silt soil in Yellow River floodplain[J]. Journal of Henan University(Natural Science), 2017, 47(6): 733-738. (in Chinese))

[31] 程超. 加筋水泥土桩锚在尚水花园深基坑支护中的应用研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019. (CHENG Chao. The Application and Research of Retaining and Protecting with Reinforced Cement Soil Piles and Anchors in Shangshui Garden Foundation Pit[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019. (in Chinese))

[32] 叶兴, 杨启红, 张超波, 等. 长江河岸边坡狗牙根根系力学性能研究[J]. 人民长江, 2022, 53(4): 195-200. (YE Xing, YANG Qihong, ZHANG Chaobo, et al. Analysis of mechanical properties of bermudagrass root system on riparian slopes of Yangtze River[J]. Yangtze River, 2022, 53(4): 195-200. (in Chinese))

Effects of changes in root diameter of typical grass-shrub plants on the stability of ecological revetment

ZHOU Zipeng[1], DING Yang[1,2], XUE Yang[3], ZHAO Jinyong[1,2], CHEN Wangyang[3], WANG Qi[1,2]

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*;
2. *Key Laboratory of Water Safety for Beijing-Tianjin-Hebei Region of Ministry of Water Resources, Beijing* 100038, *China*;
3. *China Water Investment Co. Ltd., Beijing* 100053, *China*)

Abstract: The ecological bank protection vegetation root system buried deep in the soil body is not easy to be observed, in the process of growth on the slope stability of the research there are still many deficiencies, and in the root system of soil stabilization of slope stability simulation, the existing research is mostly focused on the planting position of vegetation or root length changes on the stability of the bank to enhance the number of comparisons, and very few studies to analyze the effect of changes in the root diameter of plants on the stability of the bank. This study adopts the finite element strength reduction method, taking the slopes on both sides of Lianshi Lake in Yongding River as an example. Through MIDAS software, a finite element model of the root soil composite of the bank slope is established, and the influence of plant root diameter changes on the stability of the bank slope is quantitatively analyzed by analyzing and calculating the plain soil bank slope, *Cynodon dactylon* revetment, *Weeping forsythia* revetment, and the combination of *Cynodon dactylon* and *Weeping forsythia* revetment under different root diameters. The results show that for the same type of ecological revetment, stability increases with the increase of vegetation root diameter; For different ecological revetments, when the root diameter reaches its maximum value, the stability and safety factors of the bank slope are 11.3%, 30.2%, and 38.4% higher than those of the plain soil bank slope in *Cynodon dactylon* revetments, *Weeping forsythia* revetment, and *Cynodon dactylon* - *Weeping forsythia* revetments; The maximum displacement of the bank slope deformation was reduced by 18.47%, 32.6%, and 40.2%, respectively, compared to the plain soil bank slope. The types of revetments with varying degrees of stability are: *Cynodon dactylon*-*Weeping forsythia* revetments > *Weeping forsythia* revetment> *Cynodon dactylon* revetment>plain soil revetment. The analysis and calculation of the stability of different riparian types through the root diameter change deepens the understanding of plant root system soil fixation, and provides a reference basis for the configuration of vegetation in ecological riparian engineering.

Keywords: ecological revetment; root diameter; strength reduction fem; root solid soil; stability of revetment

(责任编辑: 祁 伟)