

常见护坡草本植物对边坡稳定性的影响

吕媛媛

(杭州交通投资建设管理集团有限公司, 浙江 杭州 310024)

摘要:近年来,高速公路边坡失稳导致的滑坡、崩塌等事故频发,植物根系在提高边坡稳定性、防止坡面侵蚀等方面效果显著。为了准确评价植物根系的加固效果,本文以千黄高速路基边坡项目为依托,通过室内植物试验获得水淹胁迫下不同植物萌发率、叶绿素含量、SOD活性、丙二醛含量以及脯氨酸含量的变化规律,综合分析得到7种植物的耐淹性大小依次为:百喜草>香根草>狗牙根>结缕草>高羊茅>黑麦草>果岭草。进一步采用数值模拟方法将土体和植物根系简化为根土复合体,分析在降雨条件下植物根系的分布密度、根须数量以及植物种类对边坡表层土体稳定性的影响。结果表明:边坡土体水平位移量、竖向位移量、总位移量随着护坡植物须根数量的增多和分布密度的增大而逐渐减小,植物根系的存在能有效提高边坡表层土体整体稳定性,防止浅层滑坡。

关键词:公路护坡;有限元分析法;稳定性;位移;降雨

中图分类号: TU42

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)03-0181-07

Effects of common slope protection herbs on slope stability

LV Yuan-yuan

(Hangzhou Transportation Investment Construction Management Group Co., LTD., Hangzhou 310024, China)

Abstract: In recent years, landslides, collapses and other accidents caused by highway slope instability are common. On one hand, plant roots have remarkable effects on improving slope stability and preventing slope erosion at shallower depths. In order to accurately evaluate the reinforcement effect of plant roots, based on the subgrade slope in Qianhuang expressway project, the changes of plant germination rate, chlorophyll content, SOD activity, malondialdehyde content and proline content of different plants under submergence stress are obtained through indoor plant experiments. The results showed that the order of submergence tolerance of 7 plants is as follows: *Paspalum natatum* > *Vetiver grass* > *Bermuda grass* > *Zoysia japonica* > *Festuca arundinacea* > *Ryegrass* > *Green grass*. Thus, the above results provide the basis for the selection of protection plants *vetiver* under rainfall condition. Furthermore, in this study, the soil and plant roots are simplified into root-soil complex by numerical simulation method, and the effects of the distribution density of plant roots, the number of root hairs and the plant species on the stability of slope surface soil under rainfall conditions were analyzed. The numerical simulation results showed that the horizontal displacement, vertical displacement and total displacement of slope soil gradually decrease with the increase of the number and distribution density of plant roots. Hence, the existence of plant roots can effectively improve the overall stability of slope surface soil and prevent shallow landslides.

Key words: highway slope protection; finite element analysis; stability; displacement; rainfall

0 引言

高速公路建设对我国社会经济发展起着至关重要的作用,是推进国家交通网络战略的关键基础。然而,在大力发展公路工程建设的同时也将不

可避免地会对周围环境产生一定程度的扰动^[1]。近年来,由于高速公路的扩张修建而导致边坡大量挖方填方的现象屡见不鲜,严重改变了自然环境的生态面貌,大大削弱了岩土体的抗剪强度,最终导致地质灾害频频发生。因此,为了增强路堤边坡稳定

收稿日期: 2021-05-08

基金项目: 浙江省交通运输厅科研计划项目(2019035)。

作者简介: 吕媛媛(1981—),女,浙江人,本科,高级工程师,主要从事公路工程、水运工程管理工作。E-mail: 234065855@qq.com。

性并且达到防止水土流失、恢复生态的目的^[2]，高速公路边坡生物防护技术得到了广泛关注。其中，植物护坡对于生态文明建设更是具有重要意义。

目前，已有学者通过研究发现植物根系对预防边坡浅层滑坡具有重要作用^[3]。在植物根系力学性质方面，程洪等^[4]采用抗剪强度试验测定根土复合体，结果表明植物根系能有效增强土体的抗剪强度。而稽晓雷等^[5]利用数值模拟方法，发现根土复合体的强度随着狗牙根的根系数量的增多、根系长度增大而增大。在模型实验方面，吴宏伟^[6]利用根土相互作用模型箱研究了大气-植被-土体相互作用系统，结果表明植物的蒸腾作用能显著提高边坡的安全系数；徐文秀等^[7]通过植物护坡模型试验发现草本植物的根、茎、叶的综合作用对增强边坡抗冲刷能力具有显著效果。

然而，上述学者的研究仅仅针对某一种植物根系对土体的加固作用，尚未分析不同品种植物根系在不同种植密度下对土体的加筋效果。本文针对千黄高速库湾高填路基段开展研究，该库弯路基段由于为一临湖边坡，冬夏季水位变化高差大，在进行植物生态护岸时需优先考虑植物在耐淹状态下的生长状态，为此本文首先通过多种常规护坡植物的水淹胁迫试验（百喜草、香根草、狗牙根、结缕草、高羊茅、黑麦草和果岭草），筛选出3种不同根系形态的植物作为研究对象（百喜草、香根草和狗牙根），并通过室内试验获得植物根系力学性质数据为有限元模拟的参数提供依据，进一步建立二维平面应变模型，分析了所筛选耐淹植物在降雨条件下不同植物种植方案对边坡的加固作用。

1 植物预选试验

为了挑选出3种能够快速生长、品质良好且根系形态不同的草本植物，首先本文进行了植物预选试验，筛选出适合用于该地区固堤护坡的植物种类。根据千岛湖库区野外调查情况，选取该区域常见的7种草本植物作为供试植物：结缕草、果岭草、黑麦草、高羊茅、狗牙根、百喜草和香根草，进行耐淹性能的试验研究。

1.1 水淹胁迫对种子萌发率的影响

本试验主要对每种植物进行两种处理：无胁迫处理（对照组）和水淹胁迫处理（试验组）。其中，试验组采用室内水淹处理种子，水淹时将种子置于水桶内，水淹高度为10 cm，每24 h换一次水，水

淹时长240 h，水淹结束后马上进行萌发实验。

萌发实验时，首先使用10%的次氯酸钠溶液对种子进行消毒，然后将对照组和试验组的种子浸泡10 h。浸泡结束后，在培养皿底垫一层滤纸，每个滤纸上放置20粒植物种子，每日在滤纸上均匀喷洒蒸馏水使其保持湿润并置于植物培养箱中，每日记录每个培养皿中种子萌发的数目。

1.2 水淹胁迫对植物生理特性的影响

本试验选用10 cm×10 cm×10 cm的盆钵，在每个盆钵中添加等量泥炭土，每盆钵中移入1 cm高的相同植物幼苗20棵，并于温室内定期浇水养护。待植物生长一个月后，对于无胁迫对照处理组的植物维持原来生长状态；对于水淹胁迫处理组，采用双套盆法，取一个大水箱，水箱中注入水，将水淹胁迫处理组的植物连同盆钵一起放入其中（如图1所示），调整水位至将植物完全淹没，连续淹没168 h后取出植物盆钵。水淹植物取出之后，在正常环境下放置3 d，3 d后检测7种植物的生理指标。



图1 水淹处理

Fig. 1 Flooding treatment

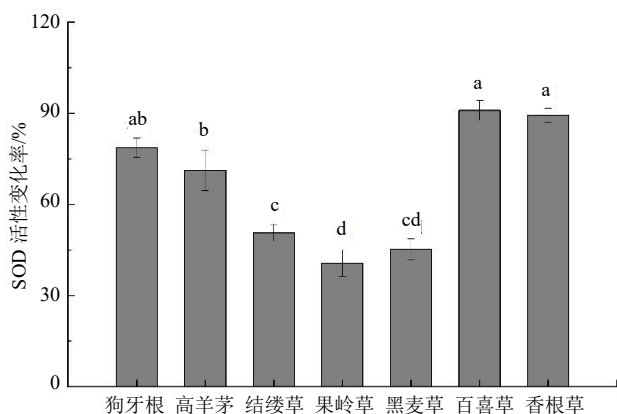
1.3 植物耐淹试验效果分析

本研究进行了不同植物的水淹胁迫处理，通过检测4种生理指标（叶绿素含量、SOD活性、丙二醛含量和脯氨酸含量）和萌发率，以耐淹性为主要筛选、评价指标，性状、生长特性为次要指标进行比较。

本研究发现水淹提高了植物的SOD活性，按照变化大小依次为：百喜草、香根草、狗牙根、高羊茅、结缕草、黑麦草、果岭草。其中变化率较大的狗牙根、百喜草和香根草的变化率在80%~90%之间，变化率较小的果岭草和黑麦草的变化率在40%左右，如图2所示。

植物中脯氨酸含量除了作为植物细胞质内渗

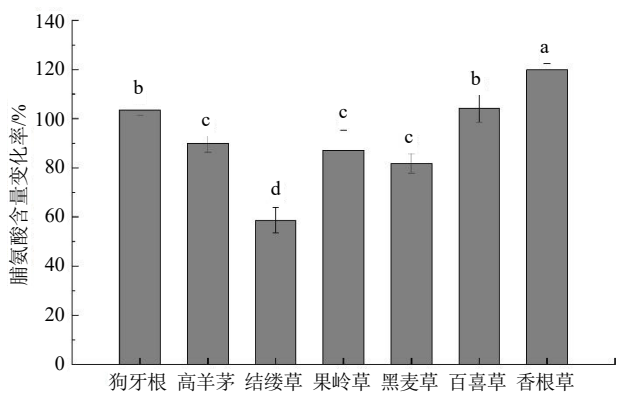
透调节物质外, 还在稳定生物大分子结构、降低细胞酸性、解除氨毒以及作为能量库调节细胞氧化还原势等方面起重要作用。本研究发现水淹提高了植物的脯氨酸含量, 按照变化大小依次为: 香根草、狗牙根、百喜草、高羊茅、果岭草、黑麦草、结缕草。其中变化率较大的狗牙根和香根草的变化率在 100%~120%之间, 变化率较小的黑麦草和结缕草的变化率在 70%左右, 如图 3 所示。



注: 数据为平均值±se, 不同小写字母代表不同植物之间存在显著性差异

图 2 不同水淹胁迫对植物叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effects of different waterlogging stress on chlorophyll content in plants



注: 数据为平均值±se, 不同小写字母代表不同植物之间存在显著性差异

图 3 不同水淹胁迫对脯氨酸含量的影响

Fig. 3 Effects of different waterlogging stress on proline content

通过整理 SOD 活性、丙二醛含量以及萌发率试验结果, 然后使用隶属函数法对 7 种植物进行了耐淹性的四因素综合评价, 计算出了 7 种植物耐淹性综合评价指数以及耐淹性能的综合排序, 见表 1。

通过表 1 综合分析显示狗牙根、香根草和百喜草的耐淹性最强, 其次为结缕草、高羊茅、黑麦草、果岭草。因此, 综合考虑各方面因素, 初步确定狗牙根、百喜草和香根草作为本研究对象。

表 1 7 种植物在水淹处理下因子得分、综合评价价值 (D) 耐淹性排序

Table 1 Factor scores and comprehensive evaluation value (D) ranking of submergence tolerance of 7 plants under waterlogging treatment

植物	F1	F2	D	R
狗牙根	0.73	-0.07	0.58	3
高羊茅	-0.23	-0.01	-0.16	5
结缕草	-0.93	-1.04	0.05	4
果岭草	-1.09	0.65	-1.23	7
黑麦草	-0.85	0.48	-0.95	6
百喜草	0.83	-0.68	1.07	1
香根草	1.55	0.69	0.64	2

注: F1 表示第一因子得分, F2 表示第二因子得分, D 表示综合评价价值, R 表示耐淹性排序

2 有限元模型建立

植物根系对边坡的稳定性具有重要的加固作用, 是增强路堤边坡稳定性并且达到防止水土流失、恢复生态环境的关键方法。本节将参考千黄高速项目路基边坡, 以狗牙根、百喜草和香根草作为护坡植物, 结合室内试验获得的植物根系和土体物理力学数据, 建立二维模型研究降雨条件下不同植物种植方案对边坡的加固作用。

2.1 模型几何尺寸和土体材料参数

本研究采用 ABAQUS 有限元软件建立二维平面应变数值模型, 坡体的几何参数参照了千黄高速项目淳安段的路基边坡横断面图, 土体采用常规理想弹塑性本构模型, 即 Mohr-Coulomb 的破坏准则, 强度指标采用固结不排水剪切强度, 土坡示意图如图 4 所示。边坡模型的左右边界约束其水平位移, 模型的下边界约束其水平和竖向位移。土体的材料参数根据室内土工试验获得, 如表 2 所示。

根据复合材料的观点和方法, 在不考虑界面单元的情况下, 以土体与植物根系的物理力学参数为依据, 将植物根系作为外荷载考虑, 直接作用在土体单元上, 通过公式将根土复合体转化为等价的均质材料, 利用均质材料的有限元方法进行求解, 分析香根草根系、百喜草根系和狗牙根百喜草混种等 3 种情况下植物根系对土坡的加固作用。其中, 有限元的网格图划分如图 5 所示, 对坡体采用四结点平面应变四边形单元、双线性位移。

为了有效地反映根系的浅层固坡效果, 本研究通过改变坡面边界条件的孔压和渗流速度来分别

表2 土体材料参数
Table 2 Soil material parameters

岩土体	重度/(kN/m ³)	饱和体积水率/%	饱和渗透系数/(m/s)	黏聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦角 φ (°)	弹性模量/kPa	泊松比
填土路堤	19.6	25	5.5×10^{-6}	25	32.5	10×10^4	0.3

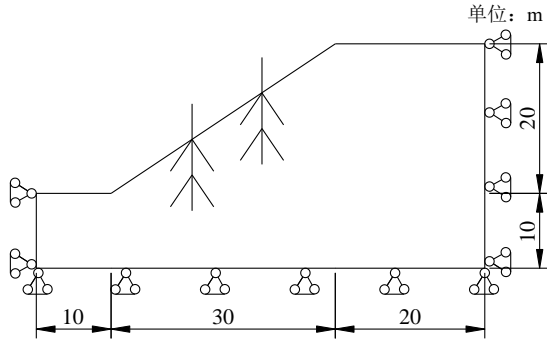


图4 土坡示意图
Fig. 4 Schematic diagram of soil slope

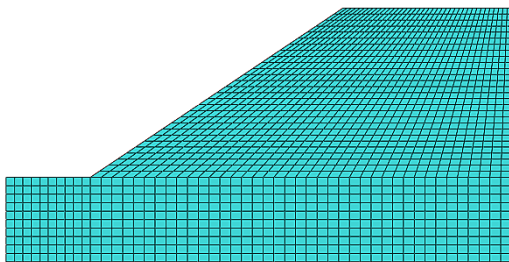


图5 网格划分图
Fig. 5 Grid generation diagram

模拟地下水分布和降雨条件。本研究选择在坡面加入降雨入渗条件，通过对比素土坡和不同分布密度的根土复合体土坡的应力及位移等变量，分析植物根系对土坡稳定性的加固效果。

2.2 不同植物根系二维模型及材料参数

(1) 香根草

香根草的根系形态复杂，通过数理统计分析的方法可以大致了解草根的分布规律。香根草根系能穿透坚硬红黏土，并穿透砾石和岩层之间薄弱的地方，可长至2~3 m深，最深达到5~6 m，并且有耐淹的特性，是典型的护坡植物。在本研究计算中，由于相对于根系的长度，香根草根系的直径变化量较小，因此植物根系的直径可以认为是不变的。根据香根草根须分布情况，并采用二维的杆单元将其简化成4枝须根和1枝主根，其中主根长度为760 mm，另外两种须根长为200 mm和370 mm，且与主根夹角分别为33°和25°。通过室内抗拉试验可知，在受拉时植物根系呈现出先受拉变形后骤然破坏的现象，根系处于塑性变形的应变范围较窄^[8]，因此在材料参数定义中近似将根系材料设置

成只能受拉力的弹性材料。并在网格划分中采用2节点杆单元T2D2，方便计算，在简化后的香根草二维模型如图6所示。在ABAQUS有限元软件材料模块中输入材料横截面面积，以实现模拟植物根系的平均直径，该平均值通过植物根系直径的统计值确定，由于本文采用二维平面应变模型，未计入根系三维尺寸的影响，对其输入值参考表3。

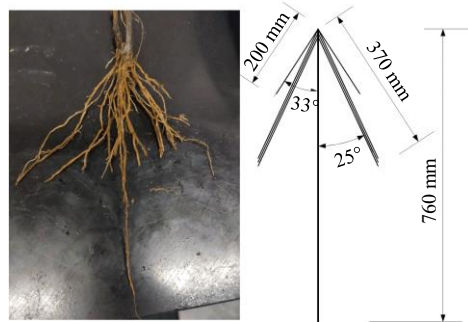


图6 香根草根系及其二维模型
Fig. 6 Vetiver grass root system and its two-dimensional model

(2) 百喜草

通过对百喜草进行调研，可知百喜草的根系主要是须根根系，主根不明显，具有粗壮、木质、多节的根状茎。因此，可将百喜草根系简化成5枝须根，长度为400 mm，根系之间的夹角为25°。如图7所示。



图7 百喜草根系及其二维模型
Fig. 7 Paspalum natatum root system and its two-dimensional model

(3) 狗牙根

根据狗牙根根系须根数量的分布情况(如图8所示)，将狗牙根根系简化成3枝须根，根须的长度为200 mm，根系之间的夹角为45°。

(4) 根系力学参数

植物根系的物理力学参数通过查阅相关文献

资料^[9-11], 取值如表 3 所示。

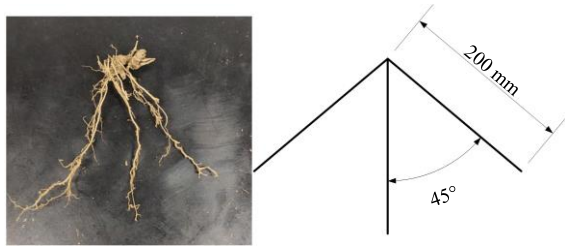


图 8 狗牙根根系及二维模型

Fig. 8 Bermuda grass root system and its two-dimensional model

表 3 植物根系力学参数

Table 3 Mechanical parameters of plant roots

草本类型	泊松比	弹性模量/ MPa	平均直径/ m	平均横截面积/ m ²
香根草	0.25	11.22	0.009	2.54×10 ⁻⁴
百喜草	0.25	20.39	0.006	1.13×10 ⁻⁴
狗牙根	0.25	16.32	0.005	1.96×10 ⁻⁴

(5) 根土接触定义

根土复合体采用嵌入式接触, 以根系为嵌入实体, 土体为被嵌入实体, 由于植物根系的自重相对较轻, 在计算过程中可以忽略根系的自重。

本文在研究香根草根系分布密度时, 采用 1、3、5、8、10 株/m 等 5 种情况进行计算分析; 狗牙根系的分布密度采用 1、4、8、12、15 株/m 等 5 种情况进行分析; 当狗牙根与百喜草混种时, 根系的混合比例取 1:1, 其分布密度采用 1、5、10、15 株/m 等 4 种分布密度。

3 计算结果分析

通过有限元数值模拟计算, 发现在边坡表面植入植物根系之后, 由于土体和植物根系之间的弹性

模量差异较大, 因此会对边坡表面土层形成一定程度上的加筋作用。当植物根系的分布密度逐步增大时, 坡体的水平位移、竖向位移以及总位移都呈现逐渐减小的趋势, 这也说明了植物根系的植入对防止边坡浅层滑坡具有重要的作用。表 4~6 分别对应为香根草、百喜草以及狗牙根与百喜草混种工况下的水平位移、竖向位移和总位移的计算结果。

根据上述计算结果, 将不同种植方案下的水平位移、竖向位移和总位移转换为位移减小量, 可得到不同种植密度以及不同植物种植方案与边坡位移减小量的关系(如图 9 所示)。由图可知, 由于植物根系的加筋作用, 使得边坡表层土体的水平位移、竖向位移以及总位移都明显减小。其中, 植物根系的植入对坡体的水平位移影响最大, 其次是对总位移的影响, 影响最小的是竖向位移, 尤其是植物根系的分布密度对边坡位移的影响。对比不同植物种植方案以及植物分布密度来看, 可以发现不同分布密度对香根草和百喜草表现出近似线性的提升效果。而当分布密度由 5 株/m 转至 15 株/m 过程时, 狗牙根与百喜草混种方案所对应的位移减小量突然增加而后保持稳定线性增长, 该现象可以说明当该方案分布密度为 5~8 株/m 时, 对边坡加固的效果尤为显著, 混种方案进一步增加种植密度效果有限。

对比不同植物种类对边坡土体的加筋效果, 可得到如下结果(见图 10)。

由图 10 可以明显看出, 在同样的分布密度下, 相较于狗牙根与百喜草混种的种植方案, 香根草的根系对坡面土体的加筋效果最好, 而百喜草根系对抵抗边坡位移的效果稍显薄弱。加之, 当随着分布密度的逐渐增加, 香根草所对应的位移减小量与狗牙根相比差距也逐渐增大。由此可以得出, 在本研究中香根草根系的加筋作用最好, 究其原因, 系香

表 4 香根草分布密度对边坡表层位移的影响

Table 4 Effect of density distribution of Vetiver grass on surface displacement of slope

香根草根系分布密度/(株/m)	0	1	3	5	8	10
水平位移/mm	10.67	10.57	10.16	9.48	8.44	7.16
竖向位移/mm	12.44	12.42	12.36	12.27	12.13	11.96
总位移/mm	16.39	16.31	16.00	15.51	14.78	13.94

表 5 百喜草分布密度对边坡表层位移的影响

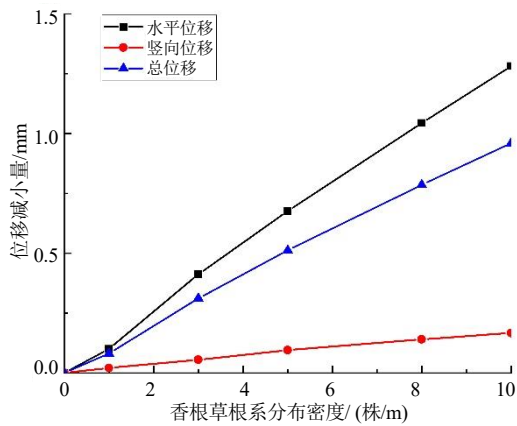
Table 5 Effect of density distribution of Paspalum natatum on surface displacement of slope

百喜草根系分布密度/(株/m)	0	1	4	8	12	15
水平位移/mm	10.67	10.61	10.28	9.63	8.68	7.52
竖向位移/mm	12.45	12.44	12.38	12.26	12.09	11.89
总位移/mm	16.40	16.35	16.09	15.59	14.89	14.07

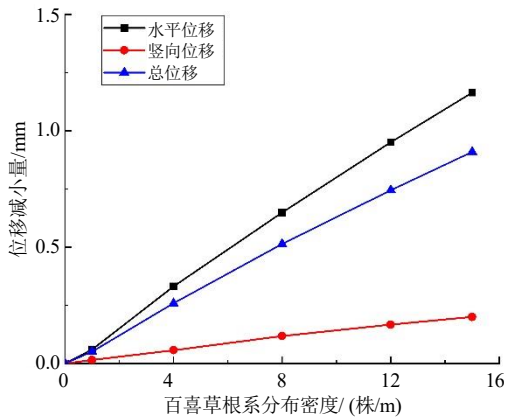
表6 狗牙根与百喜草 1:1 混种时分布密度对边坡表层位移的影响

Table 6 Effect of density distribution on surface displacement of slope with 1:1 mixture of Bermuda grass and Paspalum natatum

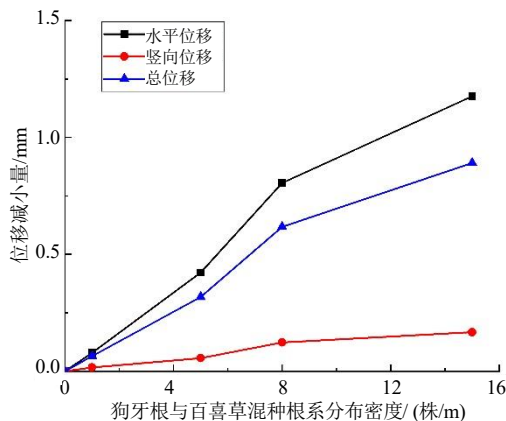
根系混种时分布密度/(株/m)	0	1	5	10	15
水平位移/mm	10.67	10.59	10.17	9.36	8.19
竖向位移/mm	12.45	12.43	12.38	12.26	12.09
总位移/mm	16.40	16.33	16.02	15.42	14.60



(a)



(b)



(c)

图9 香根草、百喜草、狗牙根与百喜草混种分布密度与位移减小量关系图

Fig. 9 Relationship between density distribution and displacement reduction of Vetiver grass, Paspalum natatum and Bermuda grass mixed with Paspalum natatum

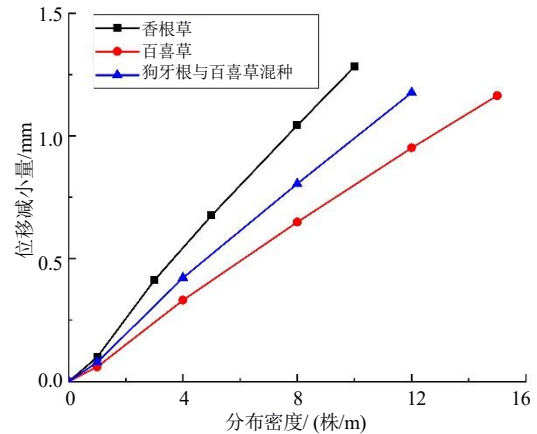


图10 分布密度和水平位移减小量关系图

Fig. 10 Relation between distribution density and horizontal displacement reduction

根草根系以主根为主、须根次之，相较于其他两种植物方案更加深入边坡土体，对边坡的加固效果愈好。并由此得出不同方案加固效果排序：香根草方案>狗牙根与百喜草混种方案>百喜草方案。

4 结 论

根据以上综合分析，可得出以下结论：

(1) 通过试验研究狗牙根、香根草和百喜草在水淹处理下种子萌发率以及植物生理特性，发现香根草的耐淹性最强，可作为库湾区路堤边坡绿化工程首选植物。

(2) 植物根系的加入对边坡水平位移的影响最大，其次是总位移，影响最小的是竖向位移。

(3) 香根草对边坡的加固作用最好，其次是狗牙根与百喜草混种，而百喜草的加固作用不如前面两者。

(4) 从植物根系形态方面可知，香根草发达的主根相较于茂密的须根更能深入边坡土体，起到更好的护坡作用。

参考文献

[1] 王纪杰, 张友育, 俞元春, 等. 不同林龄巨尾桉人工林

- 土壤的水土保持功能[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2012, 41(1): 46-52.
- WANG Ji-jie, ZHANG You-yu, YU Yuan-chun, et al. Soil and water conservation function of eucalyptus grandis plantation at different ages[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2012, 41(1): 46-52.
- [2] 王思成, 兰剑, 王宁. 高速公路边坡生物防护技术研究进展[J]. 宁夏农学院学报, 2003, 24(2): 76-81.
- WANG Si-cheng, LAN Jian, WANG Ning. Research progress of biological protection technology for highway slope[J]. Journal of Ningxia Agricultural University, 2003, 24(2): 76-81.
- [3] 陈丽华, 刘秀萍, 宋维峰, 等. 刺槐林边坡稳定性有限元分析[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 206-210.
- CHEN Li-hua, LIU Xiu-ping, SONG Wei-feng, et al. Finite element analysis of slope stability of robinia pseudoacacia forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(S2): 206-210.
- [4] 程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(5): 20-23.
- CHENG Hong, ZHANG Xin-quan. Experimental study on soil consolidation principle of herbaceous root network[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(5): 20-23.
- [5] 嵇晓雷, 杨平. 狗牙根根系形态对边坡稳定性的影响[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2013, 42(5): 531-535.
- JI Xiao-lei, YANG Ping. Effect of bermudagrass root morphology on slope stability[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2013, 42(5): 531-535.
- [6] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用: 理论与机理[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 1-47.
- WU Hong-wei. Atmosphere vegetation soil interaction: Theory and mechanism[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 1-47.
- [7] 徐文秀, 鲍玉海, 韦杰, 等. 水库消落带典型草本植物根系对土壤抗冲性能的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 65-71, 109.
- XU Wen-xiu, BAO Yu-hai, WEI Jie, et al. Effect of typical herb root system on soil anti scourability in reservoir drawdown zone[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 65-71, 109.
- [8] 陈能, 肖宏彬, 李珍玉, 等. 香根草根系形态分布模型研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(12): 87-94.
- CHEN Neng, XIAO Hong-bin, LI Zhen-yu, et al. Study on morphological distribution model of vetiver root system[J]. Journal of Central South University of Forestry Science and Technology, 2015, 35(12): 87-94.
- [9] 王泽鹏. 半干旱土石山区香根草根系抗拉力学特性研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(9): 93-95, 99.
- WANG Ze-peng. Study on the tensile properties of vetiver root system in semi-arid rocky mountain area[J]. Renmin Huanghe, 2018, 40(9): 93-95, 99.
- [10] 欧阳前超, 魏杨, 周霞, 等. 土石山区护坡草本植物根系抗拉力学特性[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 35-41.
- OUYANG Qian-chao, WEI Yang, ZHOU Xia, et al. Resistance characteristics of root system of herbaceous plants for slope protection in rocky mountain area[J]. Chinese Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 15(4): 35-41.
- [11] 嵇晓雷, 杨平, 王磊. 狗牙根根系抗拉强度试验[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(23): 5941-5942, 5948.
- JI Xiao-lei, YANG Ping, WANG Lei. Tensile strength test of bermudagrass root system[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(23): 5941-5942, 5948.