

高分子固化剂-植被复合改良砂土抗冲刷特性

吴忠¹, 刘瑾², 何勇¹, 魏继红², 宋泽卓², 孙少锐²

(1. 江苏省太湖治理工程建设管理局, 江苏 常州 213000; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要:通过在砂土边坡加入不同量的固化剂和纤维,研究高分子固化剂对植被生长的影响和复合改良砂土的抗冲刷能力,并通过扫描电镜对改良机理进行分析,得到以下结论:随着固化剂质量分数的增加,种子发芽率降低,而加入聚丙烯纤维后,植物生长情况更好。高分子固化剂与植物共同加固后的砂土坡面具有更好的抗冲刷能力,土体的黏聚力和内摩擦角均有明显增大。喷洒在砂土表层的高分子固化剂在边坡表层形成一定厚度的固化层,使得加固后的砂土具有较好的抗冲刷能力。边坡上的植物茎叶能够对降雨起到截留作用,避免水滴直接冲击砂土表层,且植物根系起到加筋作用,有效增大土体强度,从而使通过高分子固化剂和植被共同加固后的砂土坡面具有更好的抗冲刷能力。

关键词:生态护坡;砂土;高分子固化剂;植被;冲刷试验

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)05-0028-06

Erosion resistance characteristics of surface sand soil improved by polymer curing agent and vegetation//WU Zhong¹, LIU Jin², HE Yong¹, WEI Jihong², SONG Zezhuo², SUN Shaorui²(1. Jiangsu Province Taihu Treatment Project Construction Administration, Changzhou 213000, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The effects of polymer curing agent on vegetation growth and erosion resistance of sandy soil after composite improvement were studied by adding different concentration of curing agent and fibers to a sandy slope. The mechanism of improvement was analyzed by scanning electron microscopy, and the results show that with the increase of curing agent concentration, the germination rate of seeds decreases, and the growth of plants is better when polypropylene fiber is added. The sand slope surface strengthened by macromolecule curing agent and plant has better erosion resistance, and the cohesion and internal friction angle of the soil are obviously enhanced. The polymer curing agent sprayed on the surface of sandy soil forms a certain thickness solidifying layer on the surface of the slope, which makes the reinforced sandy soil have better erosion resistance. The plant stems and leaves on the slope can intercept rainfall, avoid the direct impact of water droplets on the surface of sandy soil. The plant roots play a reinforcing role that can effectively enhance the strength of soil, so that the sandy slope surface strengthened by macromolecule solidifying agent and vegetation has better erosion resistance.

Key words: eco-protection slope; sandy soil; polymer curing agent; vegetation; erosion test

砂土具有结构松散、黏结力差、透水性强等特性,大量河道砂土岸坡在受到降雨以及河流波浪的冲刷时,常发生崩塌、冲蚀、塌陷、滑坡等破坏。目前常用的措施包括喷混凝土、浆砌片石护墙及锚喷护坡等^[1-3],这些硬性防护措施可有效保证边坡的抗冲刷性,但不利于植被生长,无法满足生态环保的要求。因而探索一种既能提高砂土边坡抗冲刷性又能满足环境友好要求的砂土坡面生态防护技术是当前研究热点。

目前常见的生态防护技术是植被防护措施,一方面

是依靠植物根系对土体进行缠绕加固,提高表层土的稳定性^[4-6],另一方面是植被的覆盖层能够减缓雨滴对坡面的侵蚀,截留雨水防止地表径流,对水流起到阻力作用,从而减少坡面的冲刷破坏^[7-8]。戚国庆等^[9]将传统的边坡加固技术与植被护坡技术相结合,发挥二者各自的优点,既保证边坡的安全稳定,又实现坡面植被的快速恢复及生态环境保护。王桂尧等^[10]研究草类根系对坡面土强度及崩解特性的影响,认为土体强度与根含量呈线性关系,且草类根系能显著提高根-土复合体的抗崩解特性。张

伟伟等^[11]研究了草本植物根系对沙质土壤非饱和特性的影响,认为草本植物根系沙土的进气值降低,持水性增强。赵清贺等^[12]研究了河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果,研究成果表明,植被对累积泥沙量和径流侵蚀力的阻控效果随坡度和放水强度的增大而降低。然而,植被护坡虽然能够在一定程度上提高岸坡表层土体稳定性,且能满足生态环保要求,但也具有局限性,对土体性质、地质条件等要求较高。所以选择一种成本较低、生态环保且能改良土体性质的生态防护方法是国内外学者关注的重点。

高分子材料作为一种新型环保的土体加固材料成为国内外学者研究的热点。Qi 等^[13-14]通过一系列室内试验测定了高分子聚合物改良前后土体的特性,并分析了浓度对改良土体强度和水理特性的影响;Mousavi 等^[15]研究了高分子聚合物乳液与砂性土抗侵蚀特性的关系,并对其加固机理进行分析;Nohegar 等^[16]将高分子聚合物应用于土体的抗冲刷和抗风蚀研究中,发现其可利用聚合物电解质改良土体性质。提高土体的稳定性高分子材料利用高聚物胶结包裹土颗粒形成稳定结构,从而有效改良土体性质,提高土体的强度、抗渗和抗冲刷等性能^[17-19],还具有成本低廉、施工简便、易于降解的优良特性,并且可以满足生态环保的护坡理念,从而逐渐被应用到岸坡生态防护中。汪勇等^[20]将高分子固化剂应用于土质边坡的加固中,并对其稳定性进行了研究。李崇清等^[21]对 SH 固化剂复配无机材料加固黄土抗侵蚀进行了试验研究,研究成果表明复合材料可以弥补单一固化剂的缺点,全面有效地提高黄土边坡的抗侵蚀能力。单志杰等^[22-23]研究了 EN-1 固化剂对加固后土壤抗蚀性以及抗崩解性的影响。

本文结合植被与高分子固化剂改良砂土边坡的优点,研究这两种方法复合改良砂土边坡的抗冲刷特性。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验中所采用的高分子固化剂为聚氨酯型固化剂,浅黄色(图 1(a)),为黏稠状透明液体,可以与水以任意比例互溶,与水混合后形成乳白色溶液(图 1(b)),高分子固化剂的物理化学性质如下:密度为 1.18 g/cm^3 ,黏度为 $650\sim700\text{ MPa}\cdot\text{s}$,固化剂质量分数为 85%,凝固时间为 $30\sim1800\text{ s}$ 。高分子固化剂溶液随着水分挥发能够形成具有一定强度的弹性胶状体,对环境无污染,具有高度安全环保性。



(a) 高分子固化剂



(b) 高分子固化剂溶液

图 1 高分子固化剂溶液

试验中所使用的砂土取自于江苏省南京市江宁区,砂土的级配曲线如图 2 所示。砂土的物理参数如下:孔隙率为 $0.59\sim0.97$,干密度为 $1.35\sim1.69\text{ g/cm}^3$,相对密度为 2.65,不均匀系数为 2.27,曲率系数为 1.13。试验使用的黏土为南京下蜀土,其物理性质如下:天然含水率为 $20\%\sim27\%$,相对密度为 2.71,塑限为 22%,液限为 36.7%,塑性指数为 14.7。试验材料还包括草种、肥料(用于培育草皮)以及聚丙烯纤维。

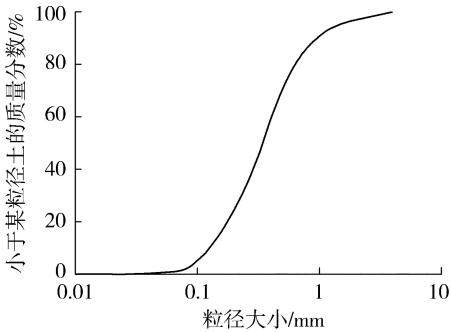


图 2 砂土粒径曲线分布

1.2 试验方案

本次冲刷试验所采用是自主研发的冲刷模型。抗冲刷模型长为 71 cm,宽为 45.5 cm,高为 18 cm,坡度为 20° 。为研究高分子固化剂对植被生长的影响以及两种复合护坡方式对砂土边坡的抗冲刷特性,设计 5 组试样。第 1 组为砂土加黏土参照样,第 2 组加入 5% 固化剂溶液,第 3 组加入 5% 固化剂溶液和 0.5% 聚丙烯纤维,第 4 组加入 10% 固化剂溶液和 0.5% 聚丙烯纤维,第 5 组加入 10% 固化剂溶液,各试样初始形态见图 3。为使植物能够更好生长,在砂土中掺入黏土,砂土和黏土的质量分别为 30 kg、2 kg,比例为 15 : 1,密度控制为 1.40 g/cm^3 ,保持试样含水率为 15%。加入聚丙烯纤维的作用是为了验证纤维的加入能否为种子萌发提供空间和空气。喷洒固化剂溶液 1.00 L,播撒 120 g 有机肥和 40 g 复合肥,并称取植物种子狗牙根 20 g、高羊茅 20 g、黑麦草 20 g,均匀播撒在试样表面。对于空白对照样,则喷洒 1.00 L 水,将试样盒放置在设计好

的框架上,定期浇水(周期5~7d),拍照记录植物生长情况。

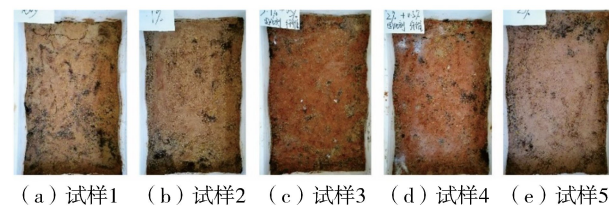


图3 抗冲刷试验各试样初始形态

本次冲刷试验分为2个阶段。首先是预冲刷试验,将流量控制为1.8 L/min,若20 min后模型表面没有破坏,增大流量为7.2 L/min。试验过程中记录初次产生冲刷的时间和冲刷量,并每隔1 min记录1次水流量,试验进行30~70 min,冲刷完毕后将塑料桶接得的水过滤并用电子秤称取饱和砂土的质量,作为冲刷量。

2 试验结果与分析

2.1 植物生长情况

种子播撒3 d后,第1组空白参照样首先发芽;6 d后,第3组试样(5% 固化剂和0.5% 聚丙烯纤维)、第2组(5% 固化剂)、第4组(10% 固化剂和0.5% 聚丙烯纤维)依次零星发芽;8 d后,第5组(10% 固化剂)开始发芽。种子发芽顺序依次为第1组、第3组、第2组、第4组、第5组。

图4为10 d后种子生长情况。从图4可以看出第1组未加入任何添加物情况下种子发芽最早,这是由于种子在土体中萌发不受任何阻碍能够顺利发芽。而加入一定量的固化剂后,由于高分子与土颗粒发生物理-化学反应,固化剂能够填补砂土和黏土间的孔隙,土颗粒间联系较紧密,当种子萌发时所需空间受到阻碍,从而发芽时间相对较晚,且固化剂添加越多,砂土之间联合越紧密,种子萌发时间越晚。当土体在添加固化剂和聚丙烯纤维情况下,聚丙烯纤维能够在土体和固化剂间创造间隙,提供种子萌发所需要的空间,并使得土体的空气流动,因此在土体加入一定量的固化剂情况下,聚丙烯纤维能够促进种子的萌发。

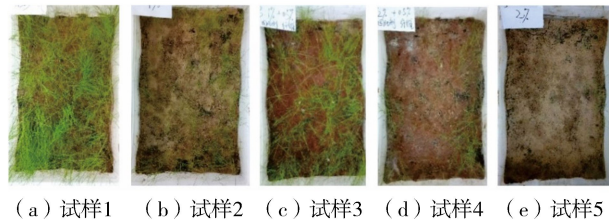


图4 10 d后植被生长情况

在植被生长初期,试样1中植物生长情况最好,

试样3次之,试样2和试样4的植物生长情况相似,试样5的相对较差。同时试样2、3、4、5的发芽率也在逐步增加,大约20 d后植物生长状态趋于稳定,如图5所示。随着时间的增加,试样1发芽率变化较小,试样3、试样2和试样4植物发芽率变化较大,大约10 d时生长率有了较大增长,而试样5发芽率依然较低。在对植被根系的牢固程度进行测试时,可以发现未加固化剂与纤维的砂土试样,植被可以被轻易拔出。而其他几组中植物根系的牢固程度依次为试样2、试样4、试样3和试样1。由此可知,虽然未加固化剂和纤维的试样植被生长情况较好,但植被的牢固程度较低,不能够很好起到稳定坡面抵抗水流冲刷的作用。图6为试验进行58 d后的植被生长情况。从图6可以看出,试样1中植被的根部出现发黄现象,而其他几组加入固化剂和纤维的试样,植被生长愈加茂盛,而只加入较多固化剂试样中植被的发芽率较低。这是由于固化剂的加入,土体变得比较密实,对种子萌发会提供一种阻碍力作用,固化剂质量分数越大,阻碍力越强,植物发芽率越低,聚丙烯纤维的加入可以缓解阻碍力的产生,固化剂提供种子萌发阻碍力的同时,可以将植根系牢牢植入土体中。较少固化剂的加入对植物的正常生长产生影响较小,当植物开始发芽时,会稍微起阻碍作用,但并不影响植物的发芽率,当固化剂质量分数较大时,在砂土坡面形成的固化层较厚,植被种子很难穿过固化层,从而影响植物的正常。

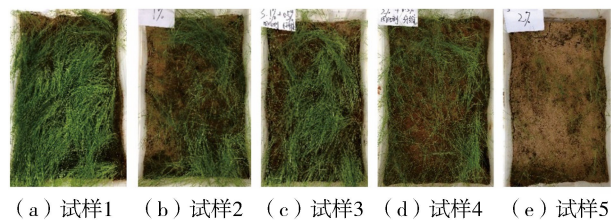


图5 20 d后植被生长情况

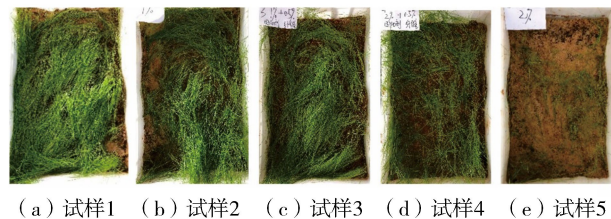


图6 58 d后植被生长情况

2.2 抗冲刷能力试验

通过自主设计的室内冲刷模型,分别对加入不同浓度固化剂和纤维的试样进行模拟降雨冲刷试验,来评价不同试验方案下改良砂土的抗冲刷特性。

图7为5组试样在各时间段内所产生的冲刷量。在进行冲刷试验的过程中,对试样1共进行了

30 min 的冲刷试验,流量控制为 1.8 L/min。在试验开始的 1 min 后,试样 1 便有冲刷量的产生,并随着时间的增加,冲刷量逐渐增多,在试验进行到 5 min 时,冲刷量达到峰值 25.53 g,之后冲刷量逐渐减少并渐渐趋于稳定,保持在 10~12 g 之间;而对试样 2、试样 3、试样 4 和试样 5 进行冲刷试验时,前 20 min 采用的流量为 1.8 L/min,坡面始终没有发生破坏。从而调整冲刷强度,将流量增加到 7.2 L/min,随着冲刷强度的增加,试样表面开始出现冲刷量,冲刷量在 1 g 左右,相比较未加固化剂和纤维的试样冲刷量有明显的减少。加入固化剂和聚丙烯纤维后,试样表面的植物根系能够与固化剂一起发挥作用,固化剂利用其自身的水溶性特点与植物根系牢牢加固原本松散的土体,且植被也能够截留一部分水流,减缓水流对坡面的冲击作用。

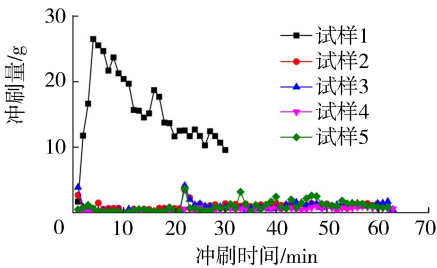


图 7 不同试样在各时间段形成的冲刷量

图 8 为冲刷试验结束后,植物生长状态及破坏形式。从图 8 可以看出,试样 1 中的植物受水流冲刷顺着水流的方向倾倒,且植物边坡坡面完整性遭到严重破坏,在坡面左右两侧形成明显的冲沟,左侧冲沟长为 20 cm、宽为 6 cm,右侧冲沟长为 25 cm、宽为 6 cm,模型上部也有一条长为 21 cm、宽为 7 cm 的冲沟,坡面到坡面下面一定深度用手摸上去比较湿;试样 3 在试验过程中,左侧出现空洞,底部砂被冲走堆积在底部,右侧底部冲砂严重程度高于左侧;试样 4 在试验过程中,整个坡面完整,冲刷量很少;试样 5 在试验过程中出口处砂被掏空,坡面完整性仍较高。



(a) 试样1 (b) 试样2 (c) 试样3 (d) 试样4 (e) 试样5

图 8 冲刷后各试样的破坏形式

植物边坡模型土体中加入固化剂后,在坡面一定深度形成了一层固化层,使原本松散的土体结合成一个整体性较高的坡面。且当在坡面种植植物后,随着时间增加,植物能够在坡面下面生根发芽,固化剂此时会与植物根系结合,坡面的土体在固化

剂和植物根系作用下更加牢固,其稳定性更高。试样 1 只有植被作用,表面依旧保持松散状态,因此受到冲刷作用时,会在表面形成冲沟,并且会有部分土体被水流带走。固化剂的加入会使坡面的渗透性降低,因此能提高土体的抗冲刷能力。

3 机理分析

高分子固化剂主要成分是聚氨酯预聚体,表面带有活性剂,且含有大量的高分子长链,高分子长链的端基带有活性异氰酸(-NCO),可与水以任意比例互溶。当高分子固化剂溶液喷洒在砂土表面时,溶液渗入到砂土表层一定深度,高分子长链端基的活性异氰酸与砂土颗粒连接在一起;同时高分子溶液随着水分挥发,形成的高分子固化膜包裹砂土颗粒,填充砂粒之间空隙,将表面松散的砂粒连接形成一种具有一定厚度的整体结构。质量分数为 5% 的高分子固化剂改良砂土试样扫描电镜如图 9 所示,从图 9 可以明显发现,高分子膜紧密地缠绕包裹砂粒,填充砂粒空隙,使得分散的砂土颗粒形成一种稳定的结构,这种结构将会增强砂土颗粒间的连接作用,减小砂土的孔隙度,提高土体的完整性,降低表面砂土层的渗透性能,从而增大砂土表面强度。随着高分子固化剂质量分数的增加,喷洒在砂土层表面的高分子固化剂溶液中的水分迅速挥发,并在砂土表面形成更厚的高分子固化膜,且高分子固化剂与砂土形成的整体结构也更厚,砂粒之间的连接更加稳固,从而使得砂土表层具有能够抵抗较大水流量的冲刷侵蚀的能力。

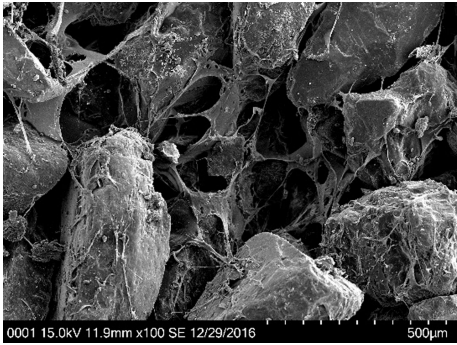


图 9 微观扫描电镜

高分子固化剂溶液在砂土表面形成的具有一定强度的固化膜,使得砂土表层保存完整,具有较好的抗冲刷性能。高分子固化剂网状膜结构的作用,可以本质上提高土体强度,增强边坡抗冲刷性,防止在砂土坡面产生大量冲沟。固化膜还可以起到保湿保肥作用,有利于植被的生长和发育,同时减缓表面径流和雨水的冲刷,从而改善砂土抗蚀能力。另外,砂土坡面植物的茎叶,可以对降雨起到较好的截留作

用,避免雨滴的动能直接作用到砂土边坡表面,能够使得快速降落的雨水在坡面形成径流,植物根系在坡面也可以对水流动能起到减弱作用。植物根系在土体内还可以起到加筋作用,不同方向的根系交错相连,既可起到锚固作用又可以增强土体的整体性。图 10 为表层砂土在固化剂和植被根系作用下形成的固化层。从图 10 可以看出,固化剂溶液由于渗流作用,进入到砂土表层一定深度,并在砂土中形成一定厚度的固化层,使得原来松散的砂粒成为一体,并且植物根系对土体也起到一定的包裹作用,从而使得砂土表层的固化膜更厚并且强度增大,能提高边坡表面的抗蚀能力。在 高分子固化剂和植被的共同作用下,砂土边坡能够达到良好的抗冲刷能力。

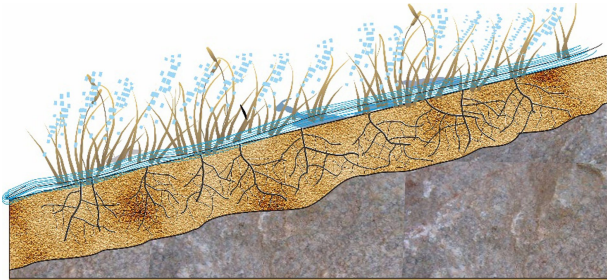


图 10 砂土表层固化剂-植被抗冲刷示意图

4 工程实例

为进一步研究高分子固化剂在边坡生态加固中的应用效果,在室内试验研究成果的基础上,将高分子固化剂应用于河道岸坡绿化加固当中。试验场地选取于江苏省常州市武进区新孟河向阳桥附近。针对该场地土质性质和边坡形态特征,结合室内试验结果,现场试验选用了狗牙根、高羊茅、苜蓿、马棘、紫穗槐等多种混合植被种子均匀播撒在坡面,并选取固化剂溶液质量分数依次为 5%, 3%, 2%, 1.5%, 1%, 0.5%, 0%, 喷洒量约为 2.5 ~ 3 L/m²,对坡面进行生态护坡。

4.1 现场施工过程

现场施工过程包括以下 7 个阶段:①坡面整平阶段:由于边坡前期主要采用机械施工,造成坡面平整度低,存在高低不平现象,对会给施工带来一定的难度,从而在施工前先对坡面进行整平。②施肥撒种阶段:为了给植被提供良好的生长环境,在坡面整平后进行肥料和植被种子播撒。③坡面润湿阶段:初始状态,边坡表层土干燥坚硬,植被很难生长,因此在种子播撒完成后,需要在坡面先喷洒一定量的水,使得坡面保持润湿状态。④固化剂稀释阶段:固化剂初始状态黏度较大,无法直接喷洒在坡面,因此在实际应用当中需对固化剂进行稀释,稀释到设计浓度后进行喷洒。⑤固化剂喷洒阶段:将稀释好的固化

剂溶液按照设计喷洒量,均匀喷洒在坡面。⑥边坡养护阶段:为减少坡面的水分蒸发和降雨冲刷,在固化剂溶液喷洒完成后,采用遮阳网对坡面进行覆盖养护。⑦绿化加固评价阶段:现场施工完成后,在对加固坡面养护一段时间后,对坡面植被生长情况以及抗冲刷性进行观察,对其加固效果进行评价。

4.2 生态护坡效果评价

现场试验期间为 9 月下旬,当天气温为 19 ~ 25℃,多云,天气条件有利于固化剂的成膜,满足固化剂护坡的施工条件要求。施工完成 3 周后,对边坡进行现场评估。不同质量分数固化剂加固后边坡的植被生长以及坡面形态特征如图 11 所示。施工结束后,经历了两次大规模的降雨,从图 11 可以看出,在经历较强降雨冲刷后,固化剂加固后的坡面几乎保持完整状态,几乎没有出现冲刷破坏的现象,且坡面植被生长状态良好。随着固化剂质量分数的增加,植被生长状况愈加良好。从图 11(g)中可以观察到未经固化剂加固后坡面的植被生长情况和坡面形态,与固化剂加固后的坡面相比,该坡面出现了明显的冲沟,且植被的生长比较稀疏。从室内试验结果和机理分析中可知,这是因为固化剂具有良好的保水性,并且可以对土壤养分起到一定的保存效果,随着固化剂质量分数的增加,植被生长得更加茂盛。从上述现场试验结果可以看出,固化剂能够提高坡面的抗冲刷并对植被生长具有一定的促进作用,达到了良好的生态护坡的效果。

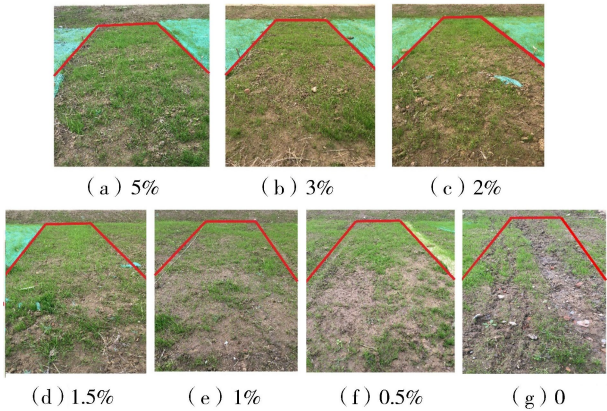


图 11 不同固化剂质量分数生态护坡效果

5 结 论

- a. 掺入高分子固化剂对植物的生长具有一定影响,随着固化剂质量分数的增加,种子发芽率降低,且加入聚丙烯纤维后,植物生长情况更好。
- b. 高分子固化剂与植物共同加固后的砂土坡面具有更好的抗冲刷能力,土体的黏聚力和内摩擦角均有明显增大。

c. 喷洒在砂土表层的高分子固化剂会迅速渗入土层一定深度,形成一定厚度的稳定结构,且在砂土表面形成的固化膜能够有效阻碍水流下渗,使得加固后的砂土具有较好的抗冲刷能力。植物的茎叶能够对降雨起到截留作用,避免水滴直接冲击砂土表层,且植物根系起到加筋作用,有效增大土体强度,从而使通过高分子固化剂和植被共同加固后的砂土坡面具有更好的抗冲刷能力。

d. 工程实例进一步验证了固化剂能够有效增强坡面的抗冲刷性能并能对植被生长起到一定促进作用,具有良好的生态护坡效果。

参考文献:

[1] 邹定保. 高路堑边坡的综合处理[J]. 中外公路, 2000, 20(1):56-58. (ZHOU Dingbao. Comprehensive treatment of high cutting slope[J]. Chinese and Foreign Highways, 2000, 20(1):56-58. (in Chinese))

[2] 孙德强, 鹿新高, 张鹏飞. 铅丝笼干砌石护坡在年楚河岸坡整治中的应用[J]. 人民黄河, 2014, 36(4): 14-16. (SUN Deqiang, LU Xingao, ZHANG Pengfei. Application on gabion dry stone pitching in the bank slope protection of the Nianchuhe River[J]. Yellow River, 2014, 36(4):14-16. (in Chinese))

[3] 高洪远, 夏应学. 喷锚支护在富池大闸边坡加固工程中的应用[J]. 人民长江, 2005, 36(8):46-47. (GAO Hongyuan, XIA Yingxue. Application of shotcrete and anchor support in slope reinforcement of Fuchi Sluice[J]. Yangtze River, 2005, 36(8):46-47. (in Chinese))

[4] EAB K H, LIKITLERSUANG S, TAKAHASHI A. Laboratory and modelling investigation of root-reinforced system for slope stabilization[J]. Soils & Foundations, 2015, 55(5):1270-1281.

[5] NOORASYIKIN M N, ZAINAB M. A tensile strength of bermuda grass and vetiver grass in terms of root reinforcement ability toward soil slope stabilization[J]. Materials Science and Engineering, 2016, 136:012029.

[6] 严登明, 翁白莎, 宋新山, 等. 那曲流域草地覆盖变化对降雨产流过程的影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 44-51. (YAN Dengming, WENG Baisha, SONG Xinshan, et al. Effect of grassland cover change on rainfall and runoff yield in Naqu Watershed[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6):44-51. (in Chinese))

[7] 晏国顺, 周明涛, 高家祯, 等. 干湿循环作用下植被混凝土结构演化[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(6): 33-39. (YAN Guoshun, ZHOU Mingtao, GAO Jiazhen, et al. Evolution of vegetation concrete structures under action of drying-wetting cycles[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6):33-39. (in Chinese))

[8] 刘宏哲, 娄厦, 刘曙光, 等. 含植物水流动力特性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(4):85-94. (LIU Hongzhe, LOU Sha, LIU Shuguang, et al.

Advances in hydrodynamic characteristics of flows with vegetation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(4):85-94. (in Chinese))

[9] 戚国庆, 胡利文. 植被护坡机制及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11):2220-2224. (QI Guoqing, HU Liwen. Study on mechanism and application of slope protection with vegetation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11):2220-2224. (in Chinese))

[10] 王桂尧, 周欢, 夏旃琪, 等. 草类根系对坡面土强度及崩解特性的影响试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2):234-241. (WANG Guiyao, ZHOU Huan, XIA Yiqi, et al. Experiment on effect of grass root system on slope soil strength and disintegration characteristics[J]. Chinese Journal of Highway Transpation, 2018, 31(2):234-241. (in Chinese))

[11] 张伟伟, 江朝华, 程星, 等. 草本植物根系对黄河故道区非饱和土特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(1):73-78. (ZHANG Weiwei, JIANG Chaohua, CHENG Xing, et al. Effects of root systems of herbs on characteristics of unsaturated soil in old course of Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1):73-78. (in Chinese))

[12] 赵清贺, 冀晓玉, 徐珊珊, 等. 河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果[J]. 农业工程学报, 2018, 340(13):178-186. (ZHAO Qinghe, JI Xiaoyi, XU Shanshan, et al. Inhibiting effect of riparian vegetation on erosion and sediment yield of slope runoff[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 340(13):178-186. (in Chinese))

[13] QI C, BAI Y, LIU J, et al. Improvement of water stability of sand admixed with water-soluble organic polymer[J]. International Journal of Polymer Science, 2020(1):1-16.

[14] JIN L, SONG Z, BAI Y, et al. Laboratory tests on effectiveness of environment-friendly organic polymer on physical properties of sand[J]. International Journal of Polymer Science, 2018(1):1-11.

[15] MOUSAVI F, ABDI E, RAHIMI H. Effect of polymer stabilizer on swelling potential and CBR of forest road material[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2014, 18(7):2064-2071.

[16] NOHEGAR A, ABBAS ZADEH F, AKBARIAN M, et al. Investigation of poly latise polymer capability in soil conservation against wind erosion case study: gahrdo sirik[J]. 2011.

[17] 刘瑾, 冯巧, 孙少锐, 等. 聚氨酯型固化剂加固砂性土抗压试验及破坏模式[J]. 地球科学与环境学报, 2017, 39(5):704-710. (LIU Jin, FENG Qiao, SUN Shaorui, et al. Unconfined compression test and failure mode of sandy soil stabilized by polyurethane soil stabilizer[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2017, 39(5):704-710. (in Chinese))

(下转第70页)