

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202004036

基于聚氨酯复合基材的岩质边坡客土 生态修复试验研究

喻永祥^{1,2}, 郝社锋^{1,2}, 蒋波^{1,2}, 刘瑾³, 李明^{1,2}, 李伟^{1,2}, 宋泽卓³

(1. 自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心, 江苏南京 210018; 2. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018; 3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210098)

摘要:为解决目前岩质边坡客土喷播生态修复中存在的客土基材滑落、坡面表层土流失严重和植被生长差等问题,采用聚氨酯有机高分子材料与土体结合组成聚氨酯复合基材,用于边坡生态修复。通过室内试验对其强度、抗冲刷性以及影响植被生长情况进行研究,并在典型岩质边坡上进行现场试验,对聚氨酯复合基材的有效性进行验证。研究结果表明:聚氨酯有机高分子对于复合基材的强度和抗冲刷性具有显著的提升作用,随着聚氨酯有机高分子浓度增加,聚氨酯复合基材的强度增加,抗冲刷能力提高。与未添加的试样进行对比,浓度为 1% 聚氨酯复合基材的强度为 113.63 kPa, 提高幅度约为 95.45%; 20% 浓度试样的峰值冲刷量为 28.8 g, 降低幅度约为 71.2%。聚氨酯有机高分子可以有效促进植被种子的发芽与生长。当聚氨酯有机高分子浓度由 0% 提高到 10% 时,种子的发芽率由 12% 提升到 68%。但当聚氨酯有机高分子浓度过大时,会对植被的发芽和生长发生抑制作用。研究结果可为岩质边坡的生态防护提供一定的参考与借鉴。

关键词: 岩质边坡; 聚氨酯; 复合基材; 客土; 生态修复

中图分类号: X141

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0174-08

An experimental study of the ecological restoration of rock slope based on polyurethane composite-based materials

YU Yongxiang^{1,2}, HAO Shefeng^{1,2}, JIANG Bo^{1,2}, LIU Jin³, LI Ming^{1,2}, LI Wei^{1,2}, SONG Zezhuo³

(1. *Technology Innovation Center of Land (Cultivated Land) Ecological Monitoring and Restoration Project of the Ministry of Natural Resources, Nanjing, Jiangsu 210018, China*; 2. *Geological Survey Institute of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210018, China*; 3. *School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China*)

Abstract: In view of the problems existing in the ecological restoration of rock slope, such as the slide of the soil substrate, the serious loss of the surface soil and the poor growth of vegetation, etc., in this paper, polyurethane organic polymer materials and soil are used to form a polyurethane composite substrate. The strength, erosion resistance and vegetation growth of the composite substrate are studied through laboratory tests. In addition, a suitable site is chosen for field test to verify the effectiveness of the polyurethane composite substrate. The specific research results show that the existence of the polyurethane organic polymer has a significant effect on the strength and anti-scour of the composite substrate, and with the increasing concentration of the polyurethane organic polymer, the strength and anti-scour of the polyurethane composite substrate also increase. Compared with the specimens not added, the strength of 1% polyurethane composite substrate is 113.63 kPa, with an increasing rate of about 95.45%. The peak scouring amount of 20% polyurethane composite substrate is 28.8 g, with a decreasing rate of about 71.2%. The polyurethane organic polymer can effectively improve the germination and growth of

收稿日期: 2020-04-08; 修订日期: 2020-05-10

基金项目: 江苏省自然资源科技项目资助(KJXM2019028); 自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心开放课题资助

第一作者: 喻永祥(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环地质研究工作。Email: 12208637@qq.com

vegetation seeds. When the concentration of polyurethane increases from 0% to 10%, the germination rate of seeds increases from 12% to 68%. When the concentration of the polyurethane organic polymer is too high, it will inhibit the germination and growth of vegetation. The polyurethane composite substrate can effectively repair the rock slope, and the effect is significant. The research results may provide some references for the ecological protection of rock slope, and are of important theoretical and practical significance.

Keywords: rock slope; polyurethane; composite-based material; external soil; ecological restoration

大规模的工程建设以及矿山开采等人为活动遗留了大量裸露的岩质边坡^[1]。这些岩质边坡在大气营力和降水作用下经历干湿循环, 表面岩石容易发生风化剥落和崩塌, 对周围建筑和人民群众的生产生活造成威胁。同时, 这些裸露的岩质边坡往往坡高壁陡、基岩裸露, 植被无法生长, 水土流失严重, 生态环境十分恶劣, 对其周围环境造成影响。

目前, 国内外用于岩质边坡生态修复的方法主要有草皮、植生袋、鱼鳞坑等^[2-4]。钟春欣等^[2]针对草皮护坡的坡面抗侵蚀性能进行了研究, 发现草皮可以有效地提升边坡的抗侵蚀能力。杨翔等^[3]对植生袋护坡的技术特点及施工方法进行了论述, 并确定了生态护坡效果。白丽华^[4]对鱼鳞坑技术在黄土高原边坡保护中的效果进行了研究, 发现该技术可有效防止沟蚀和潜蚀的发生。

近年来客土护坡成为岩质边坡生态修复的主要方法, 该方法能够在裸露岩质坡面、硬质土砂地等绿化困难地带为植被提供生长环境, 不仅可以减少削坡工作量, 而且能同时满足生态修复和护坡的双重要求^[5-7]。目前, 客土护坡已成为国内外相关工作者研究的一个重要方向, 并在边坡工程中得到广泛的推广和应用, 积累了丰富的工程经验和研究成果^[8-11]。Li 等^[12]将污泥作为一种新的客土基质组分, 发现污泥可改善客土基质的化学物理性能并促进植被生长, 并且在一定掺入量范围内, 能够减少水土、种子流失。陈意昌等^[13]通过现场试验研究了日光照射对公路边坡植被生长的影响, 建议公路边坡生态修复应充分考虑当地的地形和气候条件。但是由于这类岩质边坡的坡比大多在 1 : 0.75 以上, 客土层长期受雨水冲刷侵蚀, 容易造成表土流失和种子滑落, 致使坡面丧失适宜植被生长的条件。此外, 客土层与岩质坡面的相互附着

力差, 客土层易沿坡面发生整体滑塌或剥离, 不断削减坡面客土层的厚度, 导致客土层保水、保肥能力下降, 影响植被生长, 难以满足高陡岩质边坡生态修复的需求。

高分子聚合物具有改善土体结构、提高土体力学机械性能、增强土体抗冲刷特性等优点, 目前已在土体改良中得到广泛应用。有学者尝试将有机高分子聚合物应用于加固客土基材, 以提高复合基材机械性能, 增强抗冲刷特性、保水性等, 并取得一批重要的研究成果^[14-21]。王银梅等^[18]对比了新型高分子材料 (SH) 与水泥对黄土力学性能的影响, 结果表明 SH 改良后的黄土强度高、耐低温、水稳定性好。Liu 等^[20]通过室内研究表明有机聚合物能够有效改善砂土的抗压、抗剪、抗拉强度特性。Yang 等^[21]研究发现聚天冬氨酸改良后的砂土具有良好的抗压强度与耐久性能, 并且易于生物降解, 使用安全。上述研究成果为进一步研究有机高分子聚合物改良客土基质, 生态修复高陡岩质边坡提供了良好的基础。

本文采用聚氨酯有机高分子材料与土体结合组成聚氨酯复合基材, 通过室内试验对其强度、抗冲刷性以及影响植被生长情况进行研究, 并选择典型岩质边坡进行了现场试验, 对聚氨酯复合基材的有效性进行了验证。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用土体为南京地区广泛分布的晚更新世下蜀土, 土体经自然风干后过 2 mm 筛使用。土体整体呈黄褐色, 其基本物理性质如表 1 所示。

试验所用聚氨酯有机高分子材料为淡黄色油状液体, 密度为 1.8 g/cm³, 其中聚氨酯的含量在 85% 左右。常温下该有机高分子材料的黏度为 650 ~ 700 mPa·s,

表 1 下蜀土基本物理性质
Table 1 Basic physical properties of the Xiashu soil

物理指标	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	颗粒百分含量/%		
							0.075 ~ 1.000 mm	0.005 ~ 0.075 mm	<0.005 mm
取值	2.71	37.1	20.5	18.2	19.5	1.72	7.7	68.5	23.8

可以与水按照任意比例混合。遇水后,与水发生化学反应,由淡黄色转变为乳白色,整体呈乳液状。

1.2 试验方法

1.2.1 强度试验

为了研究聚氨酯有机高分子浓度对复合基材强度的影响,本文对不同浓度的复合基材进行了无侧限抗压试验。试验中,将试样的含水率和干密度分别控制为 19.5% 和 1.72 g/cm³,将聚氨酯有机高分子的浓度分别调节为 1%、2%、10%、20%,同时增加了未添加聚氨酯有机高分子的试样(0%)作为对照。试样采用静力压制法制备,土体与按设计比例稀释后的聚氨酯有机高分子混合后压制为直径 39.1 mm、高 80.0 mm 的圆柱状试样。制备好的试样放入 20 ℃ 恒温恒湿的养护箱中养护 48 h。无侧限抗压试验采用南京南土仪器设备有限公司生产的 YYW-2 型无侧限土体压力仪,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)要求^[22],控制压力仪的速率为 2.4 mm/min。为减少试验误差,各试样均设置了 3 个平行试样,采用 3 个试样的平均值作为结果进行分析。

1.2.2 抗冲刷试验

为了研究聚氨酯有机高分子浓度对复合基材抗冲刷性的影响,本文对不同浓度的复合基材进行了抗冲刷试验。试验中试样的具体参数和制备过程与强度试验相同。试验尺寸为 19.5 cm×12 cm×2.5 cm。制备好的试样放入 20 ℃ 恒温恒湿的养护箱中养护 48 h。完成养护后,试样被放置于坡度为 65° 的冲刷架上进行抗冲刷试验。试验中,模拟实际降雨方式进行冲刷,降雨强度设置为 2.5 L/min,冲刷时间为 20 min。在试验过程中收集各试样每分钟的冲刷混合物,经沉淀与烘干后获得各试样表面每分钟流失土体的干重。试验结束后,用式(1)计算各试样的累计冲刷率:

$$R = \frac{\Delta m}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R ——试样的累计冲刷率/%;

Δm ——试样表面每分钟流失土体干重的总和/g;

M ——各试样的初始干重/g。

1.2.3 植被生长试验

在本试验中,试样分为上下两层进行制备。各试样中下层土体相同,均为未添加聚氨酯有机高分子的土体,其含水率和干密度分别为 20% 和 1.7 g/cm³。土体混合后被置入相同的长方体植物培养盒中,并将其表面用刮刀进行粗糙化处理。上层土体中聚氨酯有机高分子的浓度分别为 1%、2%、10%、20%,同时增

加了未添加聚氨酯有机高分子的试样(0%)作为对照,其含水率和干密度分别为 19.5% 和 1.72 g/cm³。土体混合后将其置入对应的植物培养盒中。

本试验使用苜蓿、紫穗槐和马棘三种草本植物,植被种子的总重量为 10 g。所用的种子均品质优良、饱满、无病虫害,且在试验前均进行清洗、热水浸泡和消毒。植被种子被均匀地撒在各土体试样的表面。完成播种后,试样表面喷洒相同浓度和质量 of 的植被营养液,以保证植被发芽和生长过程中所需的营养。植被培养盒放置于植被培养箱中,每三天浇水一次。每天均记录种子发芽的数量和植被的生长情况。本试验历时 30 d。

2 试验结果与分析

2.1 强度试验

通过无侧限抗压试验对不同浓度聚氨酯有机高分子条件下试样的强度特性进行研究,试验结果如表 2 所示。

表 2 强度试验结果
Table 2 Strength test results

编号	聚氨酯浓度/%	土层峰值强度/kPa	土层残余强度/kPa
1	0	58.14	24.28
2	1	113.63	57.18
3	2	120.19	80.77
4	10	132.69	88.77
5	20	142.00	88.48

由表 2 可知,试样的峰值强度随着聚氨酯有机高分子浓度的增加逐渐增加。对比浓度为 0% 和 1% 试样的峰值强度可以发现,聚氨酯有机高分子的存在可以有效增加试样的峰值强度。浓度为 1% 试样的峰值强度为 113.63 kPa,与浓度为 0% 的试样比,增加了 55.49 kPa,增长幅度约为 95.45%。其余各试样峰值强度相对增长量随聚氨酯有机高分子浓度增加基本保持稳定,在 10 kPa 左右波动。试样的残余强度随着聚氨酯有机高分子浓度的增加也呈现出增加的趋势。当聚氨酯有机高分子浓度在 2% 及其以下时,浓度对于残余强度的增加影响较大。当浓度超过 2%,浓度对于残余强度的影响较小,残余强度趋于稳定。

图 1 为试样在无侧限抗压强度试验中典型的应力-应变曲线。由图 1 可知,各个浓度试样的应力-应变曲线均呈现出先增大后减小的趋势,浓度的增加提高了试样的应力峰值。除此之外,随着聚氨酯有机高分子浓度的增加,试样的脆性逐渐增强,这说明聚氨

酯有机高分子的加入可以有效增强试样的整体性,增强其本身强度。

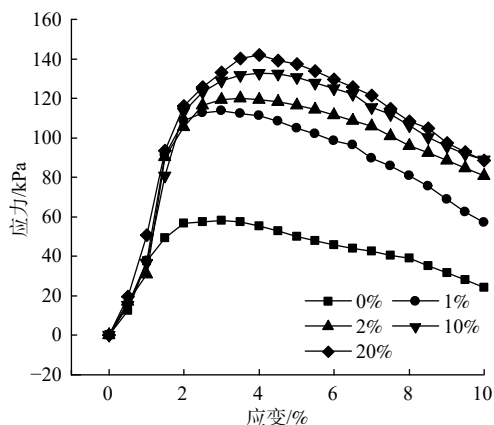


图1 试样在无侧限抗压强度试验中典型的应力-应变曲线

Fig. 1 Typical stress-strain curve of the specimen in the unconfined compressive strength test

2.2 抗冲刷试验

边坡表层土体抗冲刷性强,就可以有效地减少修复后边坡在降水等因素下发生水土流失的可能性,为

植被生长提供足够的养分和适宜的环境。本文通过室内小型模型试验对不同聚氨酯有机高分子浓度试样的抗冲刷性进行测定。图2为各试样在冲刷过程中每分钟流失土体的干重。由图可知,未添加聚氨酯有机高分子的试样存在两个峰值,分别为冲刷开始后2 min和13 min,冲刷量分别为99.8 g和101.0 g。在冲刷过程中,试样下部首先发生水土流失现象,进而在冲刷前期形成第一个冲刷峰值,随着冲刷不断进行,下部土体流失严重,上部土体失稳滑落,从而在第13分钟形成第二个冲刷峰值。达到第二个峰值后,试样每分钟流失土体的干重逐渐减小并趋于稳定。添加了聚氨酯有机高分子的试样每分钟流失土体的干重随着冲刷时间的不断增加呈现出大致相同的趋势,即先增加后减小最后趋于稳定。各试样的冲刷峰值随着聚氨酯有机高分子浓度的增加逐渐减小。20%浓度试样的冲刷峰值为28.8 g,仅为0%浓度试样第一个峰值(99.8 g)的28%。由此可见,聚氨酯有机高分子可以有效提高试样抵抗外力冲刷的能力。

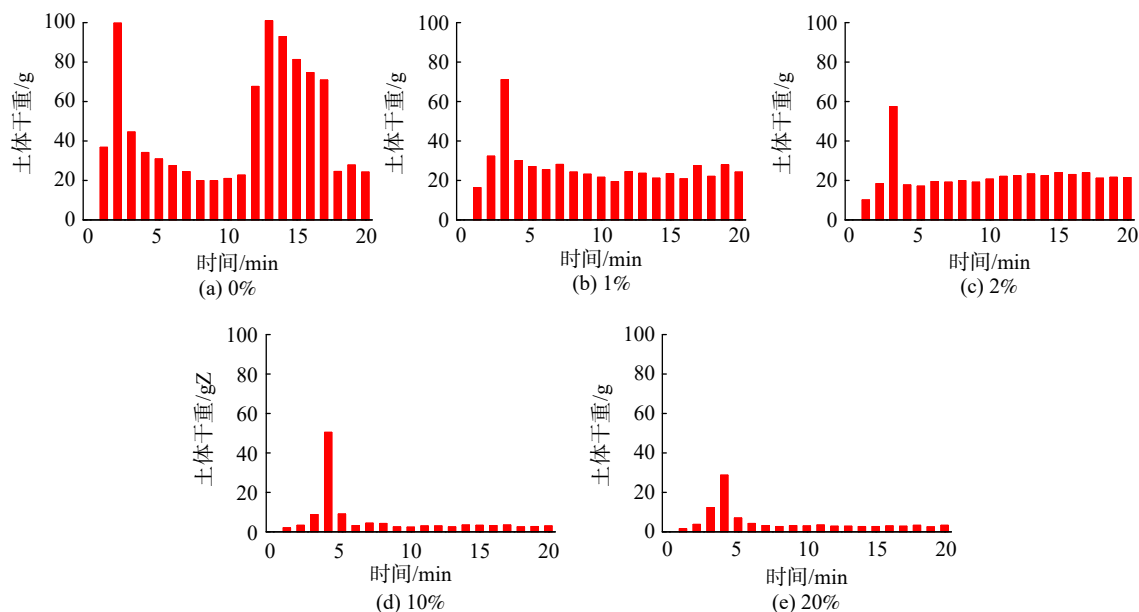


图2 冲刷过程中试样每分钟流失土体的干重

Fig. 2 Dry weight of soil loss per minute during scouring

图3为各试样的累计冲刷率。由图可知,随着聚氨酯有机高分子浓度的增加,试样的累计冲刷率逐渐降低,并且坡面破坏程度也逐渐降低(图4)。当试样中未添加聚氨酯有机高分子时,试样的累计冲刷率达到95.13%。而随着聚氨酯有机高分子浓度的增加,坡面的破坏程度也在逐渐改善,当浓度达到20%时,试

样的累计冲刷率仅为9.87%,说明聚氨酯有机高分子可以有效提高试样整体性,起到抵抗外力冲刷、保持坡面完整的作用。

2.3 植被生长试验

在完成试样的准备后,对试样进行为期30 d的培养,每天记录各试样中种子发芽数量和植被生长情

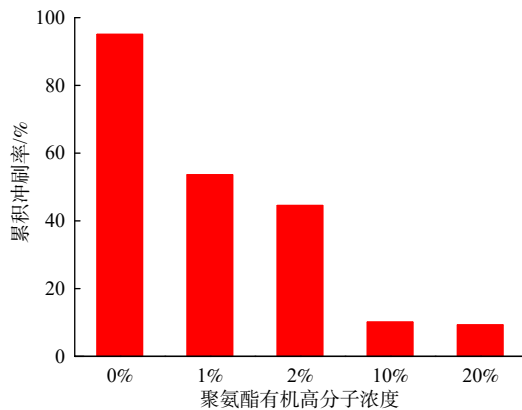


图 3 各试样的累计冲刷率

Fig. 3 Cumulative scour rate of each specimen

况。表 3 为试验过程中各试样种子发芽率统计表。由表可知,随着聚氨酯有机高分子浓度增加,种子发芽率呈现出先逐渐增大后迅速减小的趋势。当聚氨酯有机高分子浓度由 0% 提高到 10% 时,种子发芽率由 12% 提升到 68%, 增加量为 56%, 效果显著。这说明聚氨酯有机高分子可以明显地促进植被的发芽与生长,提升植被种子发芽率。当聚氨酯有机高分子浓度由 10% 提高到 20% 时,发芽率发生大幅度降低,整体水平与 0% 的试样接近。这说明当聚氨酯有机高分子浓度过高时,它会对植被的发芽与生长起到抑制作用。

由表 3 可知,聚氨酯有机高分子的存在对于苜蓿和紫穗槐均起到促进作用。其中,当聚氨酯有机高

表 3 各试样种子发芽率

Table 3 Statistics of seed germination rate of each specimen

聚氨酯有机高分子浓度/%	各种子发芽率/%			累计发芽率/%
	苜蓿	紫穗槐	马棘	
0	5	3	4	12
1	16	13	5	34
2	32	30	3	65
10	35	32	1	68
20	6	5	0	11

子浓度由 0% 提升到 10% 时,苜蓿的发芽占比提高到了 35%,为该条件下的优势物种。相反的,聚氨酯有机高分子对于马棘的发芽与生长起到了抑制作用。当聚氨酯有机高分子的浓度为 0% 时,马棘的发芽占比约为 4%。但随着聚氨酯有机高分子浓度的提升,该占比逐渐下降。当聚氨酯有机高分子的浓度为 10% 时,马棘的发芽占比仅为 1%。在浓度为 20% 的试样中,无法找到发芽的马棘植株。

图 5 为试验进行 30 d 时各试样的照片。由图可知,植被的总体生长状态与其发芽率呈现出统一性。即,随着聚氨酯有机高分子浓度的增加,植被的生长状态呈现出先逐渐趋于良好后迅速恶化的趋势,总体的转折点也为 10% 浓度的聚氨酯有机高分子。对各试样的土体表层进行观察可知,随着浓度增加,土体表层裂隙的数量、宽度和深度均呈现下降趋势。特别

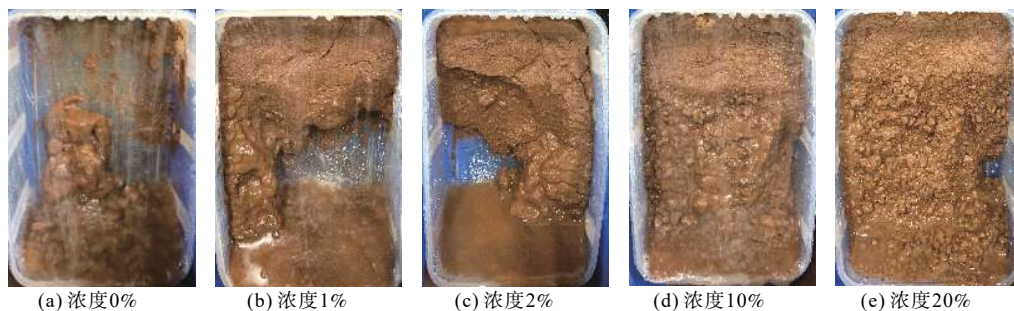


图 4 各试样的冲刷破坏图

Fig. 4 Erosion failure diagram of each specimen



图 5 试验进行 30 d 时各试样的照片 (从左至右浓度依次为: 0%, 1%, 2%, 10%, 20%)

Fig. 5 Photos of each specimen at 30 days of test (From left to right: 0%, 1%, 2%, 10%, 20%)

是 10% 和 20% 浓度的试样, 其表层土体完整, 难以发现明显的裂隙。

3 现场试验

3.1 试验场地概述

现场试验场地位于江苏省南京市栖霞山山脚, 该场地为一个由周围房屋建设人工开挖形成的岩质边坡, 坡度为 $65^{\circ} \sim 75^{\circ}$ (图 6)。由于边坡坡度较大, 表层土体难以附着在边坡表面, 尤其在强降雨条件下, 边坡表层土体流失严重。同时由于该边坡距离周围建筑物距离仅 5 m 左右, 大量的水土流失对于房屋的安全性也造成一定威胁。



图 6 现场试验场地

Fig. 6 Field test site

3.2 试验步骤

根据相关室内试验结果以及现场条件, 制定现场试验具体步骤 (图 7):

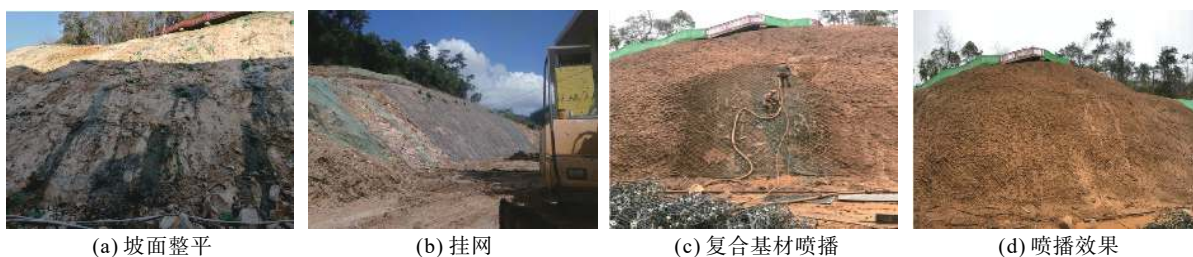


图 7 试验步骤

Fig. 7 Test steps

(1) 坡面整平阶段: 该边坡为人工开挖边坡, 坡面存在一定的松散块石和杂物, 为了避免影响后续现场试验的正常进行, 对其表面平整, 以满足后续现场试验条件。

(2) 挂网阶段: 该边坡坡度较陡, 表层岩体较为平整、光滑, 土体难以附着, 因此需要在边坡表面铺设金属网。本实验采用双层金属网, 下部金属网网孔直径为 5 cm, 上部金属网网孔直径为 10 cm。

(3) 复合基材配置以及喷播阶段: 根据室内试验结果以及试验成本等因素, 现场试验中聚氨酯有机高分子浓度设定为 10%。根据南京地区土质特点、气候因素以及室内试验的结果, 植被种子以苜蓿和紫穗槐为主。将水、聚氨酯有机高分子、下蜀土、植被种子以及其他辅助材料 (肥料、稻草、泥炭等) 混合均匀后, 利用土体喷播机将聚氨酯复合基材喷洒至岩质边坡表面。喷播时采用多次分层喷播方法, 使复合基材均匀地覆盖在岩质边坡表面。喷播后复合基材层厚度为 10 cm。为了有效地进行对比, 试验中设置对照坡面。对照组采用未添加聚氨酯有机高分子的普通基材, 其他条件完全相同。

(4) 养护及评价阶段: 完成喷播后, 在坡面上铺设遮阳网以保护植被不受阳光的直接照射, 待幼苗高度达到 4~5 cm 时拆除。定期对试验坡面 and 对照坡面浇水。同时, 对植被的发芽和生长情况以及试验坡面 and 对照坡面表层的状态进行连续记录。

3.3 试验结果

图 8(a)(b) 为完成铺设后 1 个月的现场照片。对比可知, 试验坡面植被发芽率较高, 植被生长状态良好。植被平均高度为 4~5 cm, 遮阳网可以拆除。聚氨酯复合基材表层湿润、完整, 无明显裂隙, 坡面整体修复效果较好。对照坡面植被发芽率在 10% 左右, 植被生长状态较差, 植被平均高度 1~2 cm。表面存在较多的裂隙, 部分坡面发生较大规模滑动, 底部金属网出露, 坡面整体修复效果较差。对两个坡面进行取样并测定其含水率, 试验坡面聚氨酯复合基材的含水率为 22.21%, 明显高于对照坡面普通基材的 11.85%。这说明聚氨酯有机高分子可以明显提高复合基材的持水能力。

图 8(c)(d) 为完成铺设 5 个月后现场的照片。对比可知, 试验坡面植被生长状态良好, 坡面完整, 无明

显降水冲刷破坏痕迹,边坡修复效果良好。对照坡面植被生长状态较差,仅上部存在一定植被。坡面发生

较大规模的水土流失,中下部土体已经完全流失,边坡表面降水冲刷痕迹明显,整体修复效果较差。

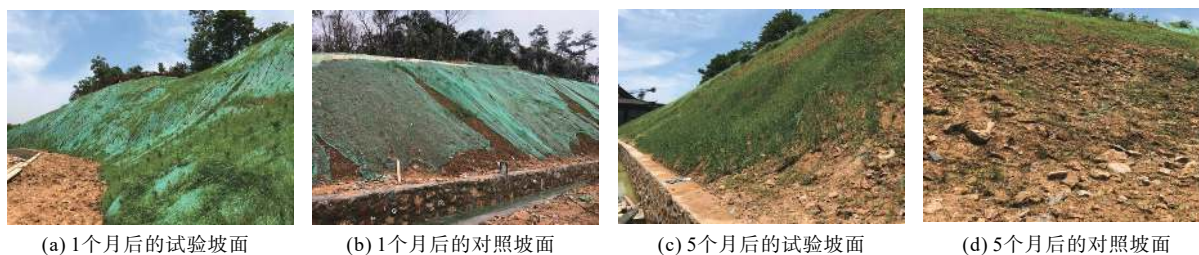


图8 现场试验坡面状态

Fig. 8 Slope condition of field test

4 结论

(1)聚氨酯有机高分子的存在对于复合基材的强度具有显著提高作用。与浓度为0%的相比,浓度为1%聚氨酯复合基材的峰值强度为113.63 kPa,相对增长量为55.49 kPa,增长幅度约为95.45%。随着聚氨酯有机高分子浓度的增加,聚氨酯复合基材的强度也随之增加。

(2)聚氨酯有机高分子可以有效提高复合基材抵抗外力冲刷的能力;且随着聚氨酯有机高分子浓度的增加,聚氨酯复合基材的抗冲刷能力也随之提高。与浓度为1%的试样相比,20%浓度试样的冲刷峰值为28.8 g,仅为0%浓度试样第一个冲刷峰值(99.8 g)的28%。

(3)聚氨酯有机高分子可以有效促进植被种子的发芽与生长。当聚氨酯有机高分子浓度由0%提高到10%时,种子的发芽率由12%提升到68%。但当聚氨酯有机高分子浓度过大时,复合基材本身强度较大,内部空间较少,难以提供植被种子发芽和生长所需的条件。

(4)聚氨酯复合基材具有较强的实用性。对比现场试验坡面 and 对照坡面发现,试验坡面植被发芽率较高,植被生长状态良好,复合基材表层湿润、完整,无明显的开裂,坡面整体修复效果较好;而对照坡面植被生长状态较差,表面存在较多的裂隙,部分坡面发生较大规模的滑动,底部金属网出露,坡面整体修复效果较差。

参考文献 (References):

[1] 何建军. 岩质边坡生态防护技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005. [HE Jianjun. Study on ecological protection

technology of rock slope[D]. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese with English abstract)]

[2] 钟春欣, 张玮, 王树仁. 三维植被网加筋草皮坡面土壤侵蚀试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 258 - 261. [ZHONG Chunxin, ZHANG Wei, WANG Shuren. Experimental research on soil erosion of turf slope reinforced by 3D vegetation net[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(3): 258 - 261. (in Chinese with English abstract)]

[3] 杨翔, 江真, 阳长江, 等. 岩石边坡肋柱植生袋+喷播植草联合植生技术的应用[J]. 重庆建筑, 2015, 14(7): 52 - 54. [YANG Xiang, JIANG Zhen, YANG Changjiang, et al. Application of combined planting and growing technology of vegetation bag and spray seeding for rock slope[J]. Chongqing Architecture, 2015, 14(7): 52 - 54. (in Chinese with English abstract)]

[4] 白丽华. 黄土高原地区管道水工保护及综合治理模式研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2009. [BAI Lihua. Pipeline protection and comprehensive management of hydraulic model in loess plateau[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese with English abstract)]

[5] 杜娟. 客土喷播施工法在日本的应用与发展[J]. 公路, 2000, 45(7): 72 - 73. [DU Juan. The application and development of the construction method of spraying and sowing of the guest soil in Japan[J]. Highway, 2000, 45(7): 72 - 73. (in Chinese with English abstract)]

[6] 李旭光, 毛文碧, 徐福有. 日本的公路边坡绿化与防护——1994年赴日本考察报告[J]. 公路交通科技, 1995, 12(2): 59 - 64. [LI Xuguang, MAO Wenbi, XU Fuyou. Greening and protection of highway slopes in Japan: A report on a visit to Japan in 1994[J]. Journal of

- Highway and Transportation Research and Development, 1995, 12(2): 59 – 64. (in Chinese)]
- [7] 孔令伟, 薛春晓, 苏凤, 等. 不同建植技术对露天煤矿排土场生态修复效果的影响及评价[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 187 – 193. [KONG Lingwei, XUE Chunxiao, SU Feng, et al. Evaluation and effect of different construction techniques on the ecological restoration of the stackpile in opencast coal mine[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 187 – 193. (in Chinese with English abstract)]
- [8] YANG Y, YANG J Y, ZHAO T N, et al. Ecological restoration of highway slope by covering with straw-mat and seeding with grass –legume mixture[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 68 – 76.
- [9] 李锐, 黄永刚, 胡筱敏. 一种植入型生态护坡的制备工艺及施工方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(8): 1201 – 1204. [LI Rui, HUANG Yonggang, HU Xiaomin. A preparation technology and construction method of implantable ecological slope protection[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2018, 39(8): 1201 – 1204. (in Chinese with English abstract)]
- [10] MERLIN G, DI-GIOIA L, GODDON C. Comparative study of the capacity of germination and of adhesion of various hydrocolloids used for revegetalization by hydroseeding[J]. *Land Degradation & Development*, 1999, 10(1): 21 – 34.
- [11] ROWE E C, WILLIAMSON J C, JONES D L, et al. Initial tree establishment on blocky quarry waste ameliorated with hydrogel or slate processing fines[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(3): 994 – 1003.
- [12] 章梦涛, 邱金淡, 颜冬. 客土喷播在边坡生态修复与防护中的应用[J]. *中国水土保持科学*, 2004, 2(3): 10 – 12. [ZHANG Mengtao, QIU Jindan, YAN Dong. Application of external-soil spray seeding technique to slopes natural eco-restoration and protection[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(3): 10 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 陈意昌, 巫清志, 张俊斌, 等. 崩塌地喷植基材不同配方对种子发芽的影响[J]. *福建农业学报*, 2013, 28(11): 1099 – 1105. [CHEN Yichang, WU Qingzhi, ZHANG Junbin, et al. The cement and mushroom waste compost of different vegetation materials with hydroseeding for seed germination on landslide[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 28(11): 1099 – 1105. (in Chinese with English abstract)]
- [14] GAO G J, YUAN J G, HAN R H, et al. Characteristics of the optimum combination of synthetic soils by plant and soil properties used for rock slope restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 30(4): 303 – 311.
- [15] LATIFI N, MEEHAN C, ABD MAJID M Z, et al. Strengthening montmorillonitic and kaolinitic clays using a calcium-based non-traditional additive: A micro-level study[J]. *Applied Clay Science*, 2016, 132/133: 182 – 193.
- [16] MARTO A, LATIFI N, EISAZADEH A. Effect of non-traditional additives on engineering and microstructural characteristics of laterite soil[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2014, 39(10): 6949 – 6958.
- [17] HONG S H, LEE E Y. Restoration of eroded coastal sand dunes using plant and soil-conditioner mixture[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, 113: 161 – 168.
- [18] LATIFI N, HORPIBULSUK S, MEEHAN C L, et al. Xanthan gum biopolymer: an eco-friendly additive for stabilization of tropical organic peat[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 1 – 10.
- [19] 王银梅, 韩文峰, 谌文武. 新型高分子固化材料与水泥加固黄土力学性能对比研究[J]. *岩土力学*, 2004, 25(11): 1761 – 1765. [WANG Yinmei, HAN Wenfeng, CHEN Wenwu. Research on comparison between mechanical behaviors of loess solidified with new polymer material and cement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(11): 1761 – 1765. (in Chinese with English abstract)]
- [20] REZAEIMALEK S, HUANG J, BIN-SHAFIQUE S. Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 146: 210 – 220.
- [21] LIU J, BAI Y X, SONG Z Z, et al. Evaluation of strength properties of sand modified with organic polymers[J]. *Polymers*, 2018, 10(3): 287.
- [22] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for Soil Test Method: GB/T 50123—1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)]

编辑: 汪美华

实习编辑: 宗 爽