

基于 PPS 型固化剂的砂土岸坡表层土 抗冲刷性能研究

邵 勇¹, 刘 瑾^{2*}, 王 颖², 孙少锐², 白玉霞²,
祁长青², 魏继红²

(1. 江苏省太湖治理工程建设管理局, 江苏 无锡 214100;

2. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要:针对厚层砂土型河道岸坡坡面稳定问题,采用 PPS 型固化剂对岸坡表层砂土进行加固。采用模拟冲刷试验对改良表层砂土的抗冲刷性能进行了一系列试验研究,并结合扫描电镜对改良后砂土的内部微观结构进行了较为深入分析。研究成果为高分子固化剂在河道岸坡厚层砂土坡面生态防护应用中的作用提供了一定的参考依据。

关键词:河道岸坡; PPS 型固化剂; 物理模型; 抗冲刷特性; 改良机理

中图分类号: TU43

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2019)11-0032-06

Study on the erosion resistance of PSS soil stabilizer treated topsoil on sandy slope

SHAO Yong^{1,2}, LIU Jin^{2*}, WANG Ying², SUN Shaorui², BAI Yuxia²,
QI Changqing², WEI Jihong²

(1. Jiangsu Taihu Lake Governance Engineering Construction Administration, Wuxi 214100, Jiangsu;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu)

Abstract: Focusing on the slope stability problem of bank slope with thick sandy soil layer, the PSS soil stabilizer was introduced in the present study to modify the topsoil meeting the engineering requirements. A series of simulated erosion tests were performed to evaluate the erosion resistance of the treated soils. SEM images were also used to further understand the inter - particle interactions. The results obtained from the experimental tests can provide some useful knowledge for the actual applications of macromolecular curing agent in the ecological protection of sandy slope.

Key words: bank slope; soil stabilizer; physical model; anti - erosion properties; modification mechanism

0 引言

随着河流的搬运沉积作用,大量泥沙堆积在岸坡,影响了河道的运输和蓄水功能,因而人们对河道进行改造,形成了较高的河道边坡。在雨滴动力

侵蚀、地表径流侵蚀以及船行波对边坡的侵蚀作用下,河道边坡的稳定性受到很大影响,经常在坡面上形成冲沟,甚至发生滑坡等灾害,不仅破坏生态环境,而且严重威胁到人们的生命财产安全。因此,对于河道砂质边坡进行防护,提高砂质边坡的

收稿日期:2019-06-05

基金项目:江苏省水利科技项目(2017010)

作者简介:邵勇(1979—),男,博士,高级工程师,研究方向为水工结构。

抗蚀能力, 是一项非常紧迫的任务。对河道砂质边坡进行防护的传统技术有: 浆砌石护坡、石笼网护坡、护面墙及喷浆防护等, 但这些方法施工麻烦、造价高且不适合植被生长, 对生态环境也会有一定影响^[1-2]。近些年, 针对以上问题, 越来越多的学者对生态护坡方法进行了大量研究^[3]。

化学加固方法作为新型生态护坡技术中的一种, 正受到国内外学者的关注。Rezaeimalek 等^[4-6]通过室内试验研究了一种水分活化的液体聚合物对砂土强度的影响; Kukal 等^[7]研究的成果表明, 不同粒径和不同种类的土壤水稳定性随着聚乙烯醇浓度增加而增加; 刘瑾等^[8]对用于加固土体的 STW 型生态固化剂的性能和加固效果进行了试验研究; 王银梅等^[9-10]研究表明 SH 加固剂能够提高砂土强度, 并对加固后砂土的抗老化和抗冻性进行了研究; 吴军虎等^[11]研究发现羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性有明显影响; 裴向军等^[12]对改性钠羧甲基纤维素加固土质边坡机制及抗冲刷性能进行了研究, 得出改性 CMC 能够有效减小土质边坡表层土壤侵蚀量, 在改善边坡表层抗水冲刷能力方面取得了良好效果。

近年来, 由于高分子固化剂具有良好的加固效果且具有生态环保等特点, 因而被广泛运用于砂性土的改良中。Liu 等^[13-15]研发了一种针对黏性土改良的固化剂 (STW 型生态土壤稳定剂), 并提出 STW 固化剂能够增强黏性土的强度, 水稳定性, 抗冲刷特性; Liu 等^[16]通过一系列室内试验研究了高分子固化剂加固后砂土的抗压强度、抗剪强度、抗拉强度以及渗透性能, 提出高分子固化剂可以有效改良砂土的强度特性和渗透性能。

本文以新型聚氨酯型高分子聚合物 (简称 PPS 型固化剂) 为加固材料, 通过在砂土的坡面喷洒 PPS 型固化剂, 开展水流冲刷物理模拟试验, 探讨 PPS 型固化剂加固后砂土表层的抗冲刷性能, 研究成果可为 PPS 型固化剂在砂土坡面加固的实际应用中提供理论依据。

1 冲刷试验方案

1.1 试验材料

本文所采用的 PPS 型固化剂为聚氨酯型固化剂, 浅黄色, 黏稠状透明液体, 可以与水以任意比例互溶, 与水混合后呈乳白色溶液如图 1 所示, PPS 型固化剂的详细物理化学性质如表 1 所示。PPS 型固化剂溶液可直接喷洒土体表面或掺入土中加固土

体, 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。

表 1 PPS 型固化剂

状态	颜色	密度	黏度	固含量	凝固时间
液体	黄色透明	1.18 g/cm ³	650 ~ 700 MPa · s	85%	30 ~ 1800s



图 1 PPS 型固化剂溶液

冲刷试验中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。砂土的最大干密度和最小干密度分别是 1.69 g/cm³ 和 1.35 g/cm³, 有效粒径 d_{10} 为 0.14, 不均匀系数 C_u 为 2.57, 曲率系数 C_c 为 1.05, 属于级配不良砂。

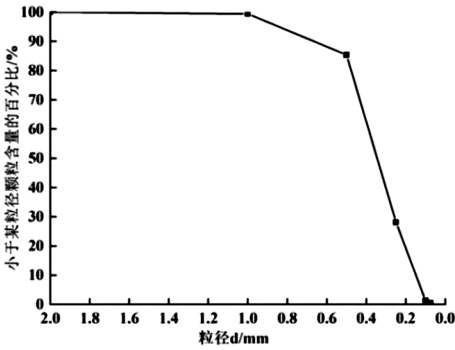


图 2 砂土粒径曲线分布图

1.2 试验方案

本次冲刷试验采用是自制冲刷模型, 模型示意图如图 3 所示。在冲刷试验过程中, 水流量控制为 3.5 L/min; 试验中控制砂土密度为 1.4 g/cm³, 44 kg 砂土分 3 层加入并击实, 装砂完成后将固化剂溶液均匀喷洒在砂土坡面, 并在室温下养护 24 h 后进行冲刷试验。冲刷试验过程中记录初次产生冲刷量的时间, 并每 1 min 用桶接 1 次径流量, 用来分析砂土侵蚀量的变化。试验进行 60 ~ 110 min, 冲刷完毕后将塑料桶接得的冲刷量进行过滤, 并用电子秤称取饱和砂土的质量, 作为冲刷量的取值。

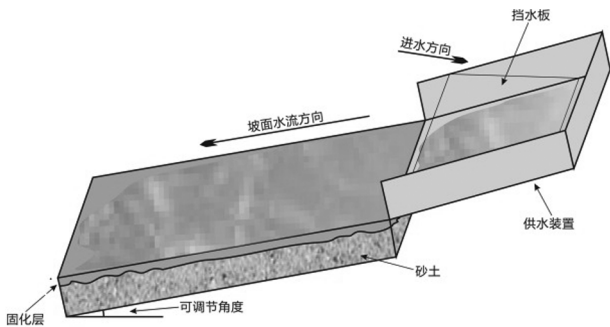


图 3 冲刷模型示意图

试验中选取 PPS 固化剂浓度分别为 0%、5%、10%、15% 和 20%，研究 PPS 型固化剂浓度对砂质坡面抗蚀能力的影响，坡度控制为 10°，喷洒量控制为 0.50 L/m²；研究喷洒量对坡面抗蚀能力的影响，选取固化剂浓度为 5%，喷洒量分别为 0.25 L/m²、0.50 L/m²、1.00 L/m²、1.50 L/m²、2.00 L/m²，坡度控制为 10°。详细试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案

方 案	固化剂浓度/%	喷洒量/(L·m ⁻²)	坡度/°
	0/5/10/15/20	0.50	10
	10	0.25/0.50/1.00/1.50/2.0	10

2 试验结果与分析

为验证不同固化剂浓度和不同喷洒量对砂质坡面抗冲刷能力的影响，试验中设计了固化剂浓度分别为 0%、5%、10%、15%、20%，喷洒量为 0.25 L/m²、0.50 L/m²、1.00 L/m²、1.50 L/m² 和 2.00 L/m²，具体试验数据如表 3 所示。

2.1 PPS 浓度对改良砂土抗冲刷能力的影响

图 4 为坡面喷洒不同浓度固化剂后初始出水时间与固化剂浓度之间的关系。由表 3 和图 4 可以看出，当固化剂喷洒量为 0.5 L/m²、浓度为 0 时，经短时间冲刷就产生了冲刷量；而坡面喷洒 PPS 型固化剂后，坡面出砂的初始时间得到了明显的加长，其中固化剂浓度为 5%、10%、15% 时，形成初始冲刷量的时间分别为 20 min、65 min、92 min，且当固化剂浓度增加到 20% 时，坡面一直保存完整状态，未产生冲刷量。从图 4 可以看出，随着固化剂浓度的增加，砂土开始出现冲刷量的时间逐渐增加，表明加入较高浓度固化剂的砂土边坡，坡面在较短时间不会发生坡面破坏。

图 5 为喷洒不同浓度固化剂坡面产生的冲刷

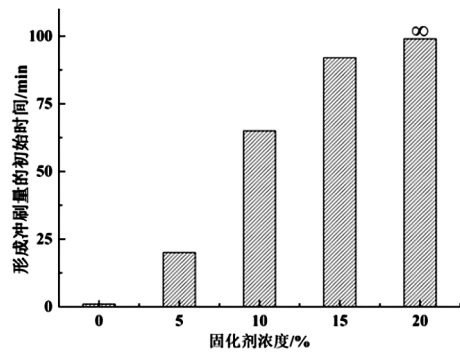


图 4 不同固化剂浓度形成初始冲刷量时间

表 3 形成冲刷量的时间

编号	固化剂浓度/%	喷洒量 L/m ²	坡度 /°	流量 L/min	形成冲刷量初始时间/min
1	0	0.50	10	3.50	1
2	5	0.50	10	3.50	20
3	10	0.50	10	3.50	65
4	15	0.50	10	3.50	92
5	20	0.50	10	3.50	/
6	5	0.25	10	3.50	15
7	5	0.50	10	3.50	20
8	5	1.00	10	3.50	/
9	5	1.50	10	3.50	/
10	5	2.00	10	3.50	/

注：“/”表示不出砂

量与时间的关系。结合表 3 和图 5 可以看出，当砂土中未加入固化剂时，一旦受到水的冲刷便会在 5 min 内产生较大的冲刷量，冲刷量最大时约 800 g，且随着冲刷时间增加冲刷量慢慢减少。当砂土表面喷洒固化剂后，产生初始冲刷量的时间会有不同程度增加，且冲刷量也会有相应的减少。其中，固化剂浓度为 5% 时，在较短时间可达到最大冲刷量约 470 g；固化剂浓度增加到 10% 时，冲刷量有明显减少；当固化剂浓度继续增加到 15% 时，初始出砂时间延长，冲刷量进一步减少；而当砂土坡面喷洒 20% 浓度的固化剂后，冲刷试验进行 110 min 后，坡面未产生破坏，也无冲刷量的形成，表明固化剂的加入会显著提高砂土的抗冲刷能力。

图 6 为喷洒不同浓度固化剂砂土坡面冲刷试验前后形态对比图。结合表 3 和图 6 可知，未喷洒固化剂的砂土表面，砂土边坡模型在短时间冲刷作

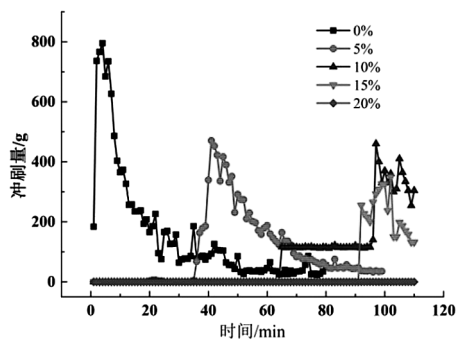


图5 不同固化剂浓度坡面形成的冲刷量

用下产生了较多的冲刷量,单次最大冲刷量可达700~800 g,且在表面形成许多深浅不一的冲沟,冲沟最长为12 cm,深度可达8 cm,累积冲刷量可达约12.50 kg,约占所加砂土总质量的四分之一。从表3和图6中还可以看出,喷洒5%浓度PPS型固化剂的砂土,冲刷试验进行20 min后开始产生冲刷量,砂土表面形成的固化剂膜的完整性遭到破坏,其内部的砂土遭到冲刷,其中从图6(b)中可以观察到,边坡模型右上方破坏最为严重,在模型右侧产生较大的冲沟,冲沟最长为7 cm,深度为7 cm,直至试验结束累积冲刷量约为9.57 kg,固化剂的加入能够在一定程度上减少砂土模型的冲刷量,形成冲沟的深度和长度有所减小,其破坏特征为一旦破坏便会在短时间内形成冲沟,且随着冲刷时间增加,深度和长度会有所增加,冲沟形状没有明显变化。

当喷洒的固化剂浓度为10%时,砂土模型抵抗冲刷破坏的时间较长,1 h后形成冲刷量,砂土顺着冲沟向坡脚运动形成冲刷量;固化剂浓度为15%时,直到试验结束,在模型左边形成较小破坏,有一个较小的坑;当固化剂浓度继续提高到20%时,在试验进行较长时间内未产生冲刷量,边坡表面只出现被水流浸湿的痕迹,依然保持完整,这是由于加入的固化剂浓度较高,固化剂将能够很好地填补砂土颗粒间的孔隙,形成一张稳定性很高的固化剂网状膜,将松散的砂土变为一张不透水的“膜”,从而抵抗水流冲刷的破坏力。

Liu 等研究表明,随着固化剂浓度的提高,砂土的渗透系数逐渐变小。当固化剂浓度提高到20%时,砂土的渗透系数趋近0,水很难从砂土表面渗入到内部,具有较高的抗冲刷能力,从而维持砂土坡面的完整性,保证了砂质边坡的稳定性。

2.2 喷洒量对改良砂土抗冲刷能力的影响

图7为固化剂浓度为5%时,不同喷洒量与出现初始冲刷量时间之间的关系。结合表3和图7可

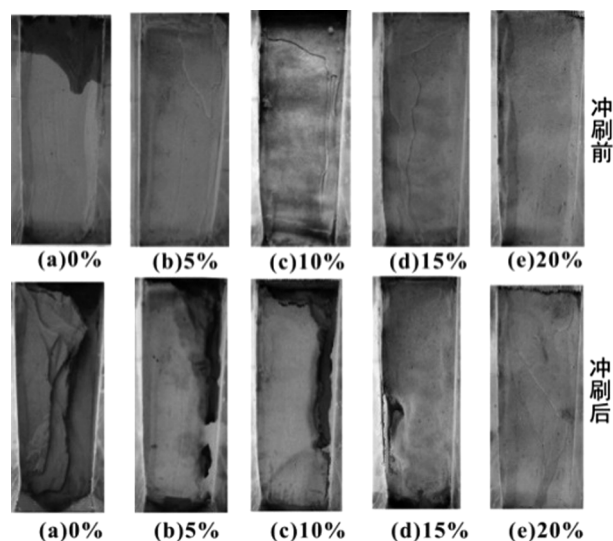


图6 不同固化剂浓度试验前后形成冲刷情况对比

以看出,当喷洒量为 0.25 L/m^2 时,砂土边坡模型出现破坏现象产生冲刷量的时间为15 min,当喷洒量增加到 0.50 L/m^2 ,在试验进行到20 min时开始产生冲刷量,而当喷洒量超过 0.50 L/m^2 后,砂土表面始终未出现冲刷量,表明在相同浓度固化剂作用下,开始出现冲刷量的时间随着喷洒量的增加而增加,当喷洒量为 1.00 L/m^2 及更大时将不再有冲刷量的出现。这是由于随着喷洒量的增加,形成的高分子固化膜越多,土体稳定性就越高,当对砂土表面进行冲刷试验时,较多喷洒量将会明显增长砂土出现冲刷量的时间,甚至不产生冲刷量。

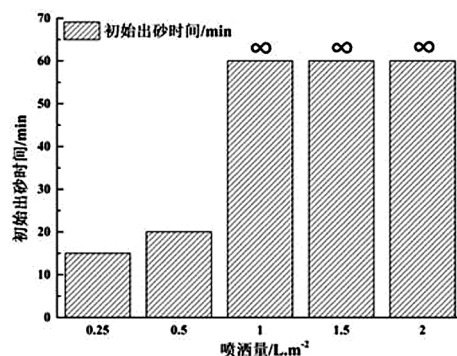


图7 初始出砂时间与喷洒量之间的关系

图8为砂土坡面在不同喷洒量情况下不同时期产生的冲刷质量。当喷洒量为 0.25 L/m^2 时,在较短时间内产生冲刷量,10 min后冲刷量达到峰值约900 g,之后随着冲刷时间的增加,冲刷量逐渐较少并趋于稳定的状态且少于100 g;当喷洒量增加为 0.50 L/m^2 时,产生初始冲刷量的时间增加,在产生冲刷量6 min后达到峰值,此时冲刷量约为470 g,随着时间的增加,冲刷量逐渐趋于稳定。由图8还可以看出,随着固化剂喷洒量的增加,冲刷量的峰

值和稳定值会有所减少,喷洒量增加到 1.00 L/m^2 及更大时在试验过程中始终没有冲刷量产生。

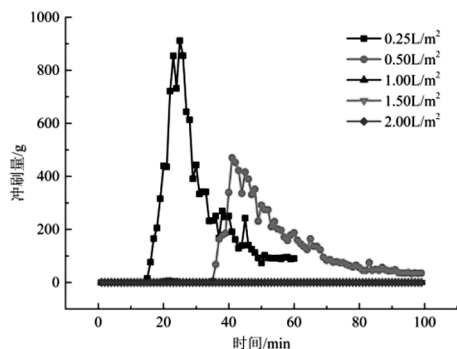


图 8 不同喷洒量坡面冲刷量与时间的关系

图 9 为砂土坡面在不同喷洒量情况下的冲刷前后破坏模式。图 9 可以看出,当喷洒量为 0.25 L/m^2 时,模型约有三分之二的面积遭到破坏,固化剂在砂土表面形成的固化层几乎全部被冲刷掉,只在模型左上方留有小部分固化层;喷洒量增加到 0.50 L/m^2 时,模型受到的破坏相对减弱,在模型右上方形成较大的冲沟,固化层也出现了相应的破坏,出现裸露的砂土;当喷洒量为 1.00 L/m^2 时,砂土坡面始终保持完整状态。这是由于当喷洒量较少时,与砂土相互作用的固化剂减少,不能够很好地填补砂土间的孔隙,形成的网状膜不密实,因此其强度和稳定性要低于喷洒量较高的砂土,当喷洒量达到 1.00 L/m^2 后,在砂土表面形成的固化层相对较密实,因此具有较好抵抗冲刷的能力,坡面形态也保持完整。

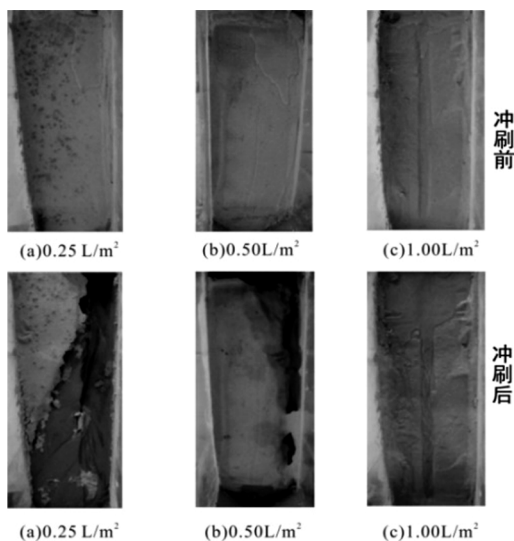


图 9 不同喷洒量试验前后形成冲刷情况对比

3 机理分析

PPS 型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($-\text{NCO}$),可与水以任意比例互溶。当 PPS 型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($-\text{NCO}$)与砂土颗粒连接在一起;同时 PPS 型固化剂溶液随着水分挥发,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。5% 含量 PPS 型固化剂改良砂土试样扫描电镜如图 10(b) 所示,从图 10(b) 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,从而增加砂土表面强度。且随着 PPS 型固化剂浓度的增加,喷洒在砂土层表面的 PPS 型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 PPS 型固化剂与砂土形成的整体结构的厚度也增加,砂粒之间的连接更加稳固,从而使得砂土层具有能够抵抗较大水流量的冲刷侵蚀。

PPS 型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。通过 PPS 型固化剂网状膜结构的作用,可以从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。从图 10(a) 可以看出,固化剂溶液由于渗流作用,溶液进入到砂土表层一定深度,并在砂土中形成一定厚度的固

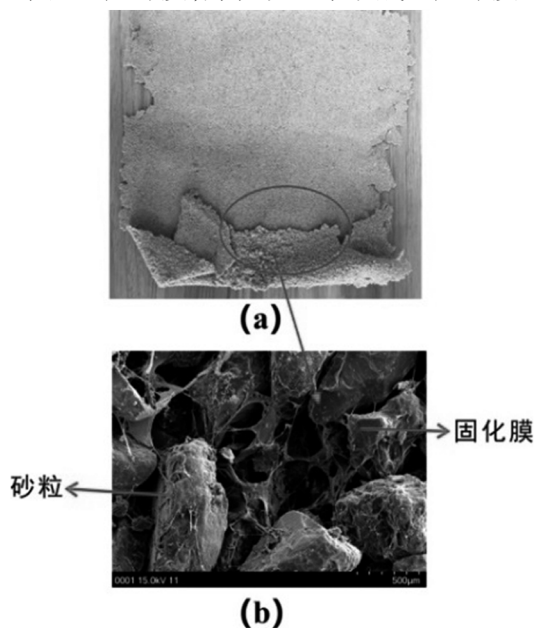


图 10 (a) 砂土表层固化层;(b) 扫描电镜

化层,使得原来松散的砂粒成为一体,并且随着 PPS 型固化剂含量的增加,砂土表层的固化膜更厚并且强度增强,有改善边坡表面的抗蚀能力。且随着固化剂喷洒量的增加,PPS 固化剂溶液渗入砂土的深度将会增大,从而在砂土表层形成的固化膜越厚,使得砂土边坡抵抗冲刷的能力就越强。

4 结论

本文通过改变 PPS 型固化剂浓度和喷洒量,对砂土边坡进行冲刷试验,研究了以上因素对 PPS 型固化剂加固后砂土的抗冲刷能力的影响,得到了以下结论:

(1)随着表面喷洒的 PPS 型固化剂浓度的增加,砂土表面产生冲刷量初始时间逐渐增长,累积冲刷量逐渐减小,当 PPS 型固化剂浓度达到 20% 时,砂土表层保存完整,不产生冲刷量。

(2)在 PPS 型固化剂浓度一定时,随着喷洒量的增加,砂土表层产生冲刷量的初始时间增长,当喷洒量达到 1.00 L/m^2 时,不再产生冲刷量。

(3)喷洒在砂土表层的 PPS 型固化剂会迅速渗入土层一定厚度,在边坡表层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。

参考文献:

- [1] 袁从华,周健,杨明亮. 高速公路膨胀土边坡整治[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1):3073—3078.
- [2] 冯建刚,许英,周效国. 一种分析小桩距抗滑桩加固边坡稳定的新方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12):1942—1945.
- [3] 金秋,陈文猛. 生态护坡在黄河故道整治工程中的应用研究[J]. 江苏水利, 2018.
- [4] Rezaeimalek S, Huang J, Bin - Shafique S. Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization [J]. Construction & Building Materials, 2017, 146:201—220.
- [5] NWANKOW K N. Polyacrylamide as a soil stabilizer for erosion control[R]. Madison: Wisconsin Department of Transportation, 2001.
- [6] NIMANKA P P, SUMUDU N W, YU H, et al. Stabilization of immiscible polymer blends using structure directing metal organic frameworks (MOFs) [J]. Polymer, 2014, 55(8):2 028 - 2 034.
- [7] Kukal S S, Kaur M, Bawa S S, et al. Water - drop stability of PVA - treated natural soil aggregates from different land uses[J]. Catena, 2007, 70(3):475—479.
- [8] 刘瑾,施斌,黄河,等. STW 型生态土壤固化剂改良工程黏性土胀缩性试验研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6):820—825.
- [9] 王银梅,谌文武,韩文峰. SH 固沙机制的微观探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(4):650—654.
- [10] 王银梅,谌文武. 新型化学固沙材料性能的试验研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1):108—111.
- [11] 吴军虎,陶汪海,王海洋,等. 羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2):117—123.
- [12] 裴向军,杨晴雯,许强,等. 改性钠羧甲基纤维素胶结固化土质边坡机制与抗冲刷特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11):2316—2327.
- [13] LIU J, SHI B, JIANG H T, et al. Improvement of water - stability of clay aggregates admixed with aqueous polymer soil stabilizers[J]. Catena, 2009, 77(3):175—179.
- [14] LIU J, SHI B, JIANG H T, et al. Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer[J]. Engineering Geology, 2011, 117(1):114—120.
- [15] PER X J, ZHANG F Y, WU W J, et al. Physicochemical and index properties of loess stabilized with lime and fly ash piles[J]. Applied Clay Science, 2015, 114(1):77—84.
- [16] LIU J, Qi X, ZHANG D, et al. Study on the Permeability Characteristics of Polyurethane Soil Stabilizer Reinforced Sand[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017(3):1—14.