

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.010

# 高分子稳定剂改良河道岸坡表层砂土水稳定性 试验研究\*

王琼亚, 刘 瑾, 李 鼎, 吴思媛, 张煜婷, 王浩楠

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 针对河道岸坡表层砂土水稳定性问题, 采用高分子稳定剂对砂土进行改良, 结合浸泡崩解测试法和浸泡剪切测试法对改良砂土的水稳定性进行一系列的试验研究, 并对砂土改良前后的水稳定性进行对比分析, 并结合微观扫描电镜对改良机理进行分析。研究表明: 稳定剂可以提高河道岸坡表层砂土的水稳定性。改良砂土随着稳定剂含量和密度的增大, 崩解后的散开面积减少, 当稳定剂含量达到0.3%时, 试样呈现稳定状态。改良砂土试样在200 kPa轴向应力下的剪应力峰值整体上随稳定剂含量和密度的增加而增加。改良砂土的水稳定系数 $K$ 随着稳定剂含量和砂土密度的增加而增大; 当稳定剂含量大于3%时, 改良砂土的稳定系数 $K$ 均达到90以上。高分子稳定剂作为一种土体改良材料, 与水混合后加入到砂土中, 可填充砂土颗粒间的孔隙, 包裹和连接砂土颗粒, 形成一个整体的网状膜结构, 提高砂土的水稳定性。研究结果可为河道岸坡有效治理提供一定的参考。

**关键词:** 河道岸坡; 砂土; 高分子稳定剂; 水稳定性; 室内试验

**中图分类号:** TU443   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0566-08

## Experimental Study on Water Stability of Polymer Stabilized Sand on River Bank Slope Surface

WANG Qiongya, LIU Jin, LI Ding, WU Siyuan, ZHANG Yuting, WANG Haonan

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** This paper aims to improve the mechanical properties of sand by using polymer soil stabilizers, and further to deal with the problem of water stability of surface sand on river slope. A series of experimental studies on water stability of the improved sand were carried out first in combination with immersion caving test and immersion shear test. Then the water stability of the sand before and after the improvement was compared and analyzed in detail. Finally, the improved mechanism was further analyzed by scanning electron microscope (SEM). Results show that polyurethane type polymer soil stabilizers can effectively improve the water stability of river slope surface sand. With the increase of stabilizer content and sand density, the dispersed area of the improved sand decreases after disintegration. When the stabilizer content beyond 0.3%, the sample presents a stable state, remaining intact.

\* 收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-08-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41472241)、江苏省水利科技项目重大技术攻关项目(2017010)、河海大学2018年大学生暑期社会实践项目(2018)、中央高校基本科研业务费(2016B05914)资助

作者简介: 王琼亚(1996-), 女, 硕士研究生。主要从事地质工程方面的研究。Email: hhu\_wqy@163.com

通讯作者: 刘 瑾(1983-), 女, 教授, 博导, 博士。主要从事环境地质工程方面的研究。Email: jinliu920@163.com

On the whole, the shear strength of the improved sand samples under a vertical confinement of 200 kPa increases as the stabilizer content and density increasing. The water stability coefficient (K) of the improved sand also shows an increasing tendency with the increase of the stabilizer content and density. When the stabilizer content exceeds 3%, the stability coefficient (K) is larger than 90. Polymer soil stabilizers is a kind of soil improvement material, which can react with water and be easily mixed with sand. Therefore, the pores between sand particles can be filled, thereby the sand particles can be wrapped and connected to form a membrane structure to improve the water stability of sand. This research can provide some references for effective treatment of river bank slope.

**Keywords:** river bank slope; sand; polymer soil stabilizers; water stability; laboratory test

## 引 言

河道岸坡在水力和重力的复合侵蚀下极易发生崩塌等形式的失稳,从而危害堤防安全及河道生态,特别是河道边坡表层砂土体由于结构松散、黏聚力低,在水的作用下其坡面更容易出现冲刷破坏和水土流失等问题<sup>[1-5]</sup>。针对上述问题,目前常采用的措施有工程防护和植被防护,其中工程防护措施是一种比较常见的河道岸坡加固方式,主要有加筋防护、锚杆防护、挡土墙防护、抗滑桩防护等,这些常用措施虽然可以在一定程度上提高岸坡的稳定性但是不能改变土体的工程性质,导致在环境发生变化时所采用的工程措施失效<sup>[6-8]</sup>;植被防护措施在很大程度上减少了水土流失,但是部分新开发的岸坡在植被生长稳定之前就已经遭到破坏<sup>[9]</sup>。因此,探索一种既能改变土体性质又能稳定有效的加固措施是一项紧迫任务。

高分子稳定剂作为一种土体加固材料,既可以改良土体的性质,提高土体的稳定性又能促进植被生长。国内外学者在稳定剂改良砂土方面的研究已取得较大进展,任伟伟等<sup>[10]</sup>提出了掺加KMP和GGBS-MGO新型稳定剂固化稳定复合Zn、Cl污染砂土;常志璐等<sup>[11]</sup>提出了椰丝纤维和双聚高分子材料能够改良粉砂土;刘瑾等<sup>[12-14]</sup>采用高分子稳定剂对改性土的强度等进行了室内试验研究;王银梅等<sup>[15-16]</sup>利用SH型水溶性高分子材料提高固沙的强度、抗风蚀能力等;黄河等<sup>[17-18]</sup>研究了STW型稳定剂对砂土的强度、抗风蚀能力的影响;陆峰军等<sup>[19]</sup>研究了生态土壤稳定剂对土质边坡稳定性的影响;M.A.Mohsin等<sup>[20]</sup>提出聚丙烯酰胺具有良好的弹性和稳定性,能够提高改性沙丘土的抗风蚀特性,R.Collins等<sup>[21]</sup>研究了纤维和聚合物乳液在阿拉斯加

内陆地区新建道路路堤治理水土流失有着良好的效果;E.I.Ekwue等<sup>[22]</sup>通过室内降雨试验装置测试了Soiltac改良后的砂性土、粉质土、黏土在不同状态下的抗侵蚀强度;S.Rezaeimalek等<sup>[23-24]</sup>通过甲基二苯基二异氰酸酯基液体聚合物对富含硫酸盐的黏土和级配不良的砂土进行了试验,并取得了可观的效果。上述研究表明,高分子稳定剂既可以在很大程度上利用表面活性剂改变土粒表面亲水性质提高土体的性质,也能够促进植被的生长,同时对高分子稳定剂加固河道砂土岸坡问题有启示作用。在分子加固过程中,除了岸坡砂土的抗渗透性、抗压等性能外,其水稳定性也是评价河道岸坡稳定性的一个重要因素。

本文针对河道岸坡表层砂土水稳定性问题,采用高分子稳定剂对河道岸坡表层砂土进行改良,结合浸泡崩解测试法和浸泡剪切测试法对改良砂土的水稳定性进行评价,验证高分子稳定剂提高岸坡坡面砂土水稳定性的可行性,为河道岸坡坡面有效治理提供一定的参考依据。

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 试验材料

本次试验采用的是聚氨酯型高分子稳定剂,其为淡黄色透明油状流体,聚氨酯型稳定剂密度为 $1.18 \text{ g/cm}^3$ , $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 黏度为 $650\sim 700 \text{ MPa}\cdot\text{s}$ ,抱水量不低于40倍。该稳定剂具有较强的稳定性,能够与水以任意比例混合形成稳定剂溶液,并且稳定剂溶液的黏度随温度升高呈现先增加再减小的变化趋势;随溶液浓度增加逐渐降低。稳定剂主要用于加固砂粒含量超过50%的砂土,改性后的土体强度、稳定性等在一定程度上有所提高,同时具有耐久性强、可自然降解、生态环保等特征。

砂土通常是指粒径大于0.075 mm的土粒含量多于50%，且粒径大于2 mm的土粒含量不多于50%的土，试验所用砂土取自安徽省芜湖市六郎镇河道岸坡，砂土的物理参数和粒径分布分别如表1和图1所示。

表1 砂土物理参数  
Table 1 Physical parameters of sand

$\rho_{\max}/$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$\rho_{\min}/$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$n_{\max}$	$n_{\min}$	$C_c$	$C_u$	$G_s$
1.66	1.34	0.97	0.59	1.13	2.27	2.64

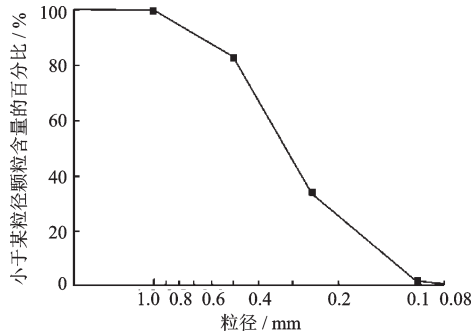


图1 砂土的粒径分布曲线

Fig.1 Particle size distribution of sand

## 1.2 试样制备

本次试验中选取的高分子稳定剂含量分别为0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、1%、2%、3%、4%、5%，砂土密度分别为1.4、1.5、1.6  $\text{g}/\text{cm}^3$ ，设定砂土试样的含水率为10%。首先，将取回的砂土自然风干并进行筛选、备用；按照设置好的变量进行材料配比，分别对高分子稳定剂、水及砂土进行称重，然后将高分子稳定剂与水搅拌后的混合溶液，与砂土充分搅拌后倒入砂土试样模具中并进行压实，制备成直径为61.8 mm，高为20 mm的砂土试样，改良砂土试样的初始面积 $S_0=29.28 \text{ cm}^2$ ，最后将其放入温度为20  $^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱中进行养护，48 h后将砂土试样从恒温箱中取出进行浸泡崩解测试试验及浸泡剪切测试试验。本文共开展了26组试验，每组试验共三个平行样，选取它们的平均值作为改良砂土试样水稳定性的参考依据。

## 1.3 试验方法

常规水稳定性试验方法的测试结果区别较小，这是因为当稳定剂含量超过0.3%时，改良砂土试样在水中浸泡后保持结构完整，破坏形态不明显。

本文将采用浸泡崩解测试法和浸泡剪切测试法对不同稳定剂含量及不同密度的改良砂土试样进行试验测定。具体的试验方法为将制备好的改良砂土试样养护48 h后，将其与砂土试样模具一同放置于盛水容器中，静态浸泡24 h(改良砂土的水稳定性随浸泡时间增加而逐渐降低)后分别进行上述两种试验。浸泡崩解测试法是将浸泡24 h后的砂土试样模具缓慢取出，测定试样的崩解时间与崩解后的面积 $S_n$ ；对浸泡24 h后的砂土试样进行浸泡剪切测试试验，采用南京土壤仪器厂生产的ZJ型应变控制式直剪仪，选取200 kPa的轴向应力对其进行剪切试验，测定其剪应力峰值 $\tau_n$ 。

根据试验结果分析稳定剂含量与砂土密度对高分子稳定剂改良砂土的水稳定性的影响，通过计算公式对试验结果进行定量分析，并据此对改良砂土试样的水稳定性进行进一步的评价。

## 1.4 水稳定性计算方法

本次试验采用浸泡崩解测试法与浸泡剪切测试法对改良砂土水稳定性进行测定，并提出静态水稳定性系数 $K$ 对砂土试样的水稳定性进行评价， $K$ 值越大，改良砂土试样的水稳定性越强；反之，则越弱。具体计算方法为：

$$K = \frac{S_1 - S_n}{S_1 - S_0} \times 50 + \frac{\tau_n}{\tau_{\max}} \times 50 \quad (1)$$

式中， $K$ (无量纲)为静态水稳定性系数，随试样水稳定性的提高而增大； $S_1$ 为未改良试样散开后稳定的面积， $\text{cm}^2$ ； $S_0$ 为改良砂土试样初始面积， $\text{cm}^2$ ； $S_n$ 为改良砂土试样散开后稳定的面积， $\text{cm}^2$ ； $\tau_n$ 为改良砂土试样泡水后剪应力峰值，kPa； $\tau_{\max}$ 为改良砂土试样剪应力峰值中的最大值，分别取不同稳定剂含量及不同密度下剪应力峰值中的最大值，kPa。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 稳定剂含量对砂土水稳定的影响

本文通过浸泡崩解测试法和浸泡剪切测试法研究不同含量的高分子稳定剂对加固砂土岸坡表面表层砂土水稳定性的影响。

#### 2.1.1 试样崩解后的散开面积

浸泡崩解测试法的试验结果如表2、图2和图3所示。从表2可以看出，密度为1.4  $\text{g}/\text{cm}^3$ 的砂土试样在未加入稳定剂以及稳定剂含量为0.1%时的崩

解时间为 2 s,当稳定剂含量为 0.2% 时,砂土试样崩解时间为 4 s,当稳定剂含量超过 0.3% 时,砂土试样浸泡 24 h 后未发生崩解,这说明砂土试样的崩解时间随高分子稳定剂含量的提高而增加,并且稳定剂含量增加到一定程度后试样不再崩解。改良砂土试样在不同稳定剂含量下,浸泡 24 h 崩解后的情况如图 2 所示,由图中可以看出当砂土中未加入稳定剂时,试样在水中浸泡崩解后的散开面积较大,并且有少量砂土颗粒被分散到中心的外围;当稳定剂含量提高到 0.1%、0.2% 时,砂土试样仍然能够保持原本形态,周围有部分土体溶到水中;当稳定剂含量达到 0.3% 时,试样不再崩解,仅在试样周围有极少量的砂土颗粒,崩解后的面积见表 2。当改良砂土试样密度为  $1.4 \text{ g/cm}^3$  并且没有高分子稳定剂作用时间,试样崩解的面积为  $102.91 \text{ cm}^2$ ,比原试样增大了约 2.5 倍,由图 3 可以看出,随着稳定剂含量的提高,改良砂土试样的崩解面积逐渐减小,当稳定剂含量超过 0.3% 时,试样去掉模具后未发生破坏,形态保持完整并且不再发生崩解。这说明砂土试样的崩解面积随高分子稳定剂含量的提高而减小,当稳定剂含量提高到 0.3% 及以上时,试样不再崩解。

表 2 浸泡崩解测试及浸泡剪切测试试验结果

Table 2 Results of immersion disintegration test and immersion shear test

编号	稳定剂含量/%	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	崩解时间/s	崩解后的散开面积/ $\text{cm}^2$	剪应力峰值/kPa	稳定系数 K
1	0	1.4	2	102.91	46.65	13.78
2	0.1	1.4	2	64.99	55.02	42.00
3	0.2	1.4	4	49.61	63.73	55.02
4	0.3	1.4	$\infty$	29.28	87.10	75.74
5	0.4	1.4	$\infty$	29.28	88.15	76.05
6	0.5	1.4	$\infty$	29.28	97.75	78.88
7	1	1.4	$\infty$	29.28	106.15	81.36
8	2	1.4	$\infty$	29.28	133.65	89.49
9	3	1.4	$\infty$	29.28	137.49	90.62
10	4	1.4	$\infty$	29.28	158.26	96.76
11	5	1.4	$\infty$	29.28	169.22	100

### 2.1.2 剪应力—位移曲线

为了对不同稳定剂含量的改良砂土试样的水稳定性进行进一步的评价,本文采用浸泡剪切测试法对浸泡后的改良砂土试样进行强度测定。图 4 显示出密度为  $1.4 \text{ g/cm}^3$  的不同稳定剂含量的改良砂

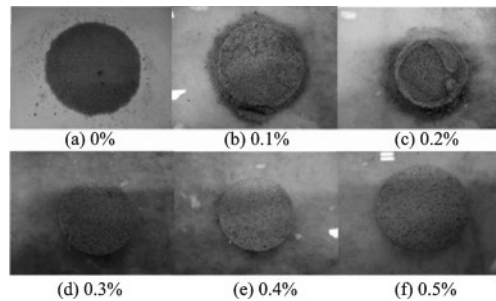


图 2 试样随稳定剂含量变化散开状态

Fig.2 Photos of samples with different stabilizer contents after being immersed for 24 h

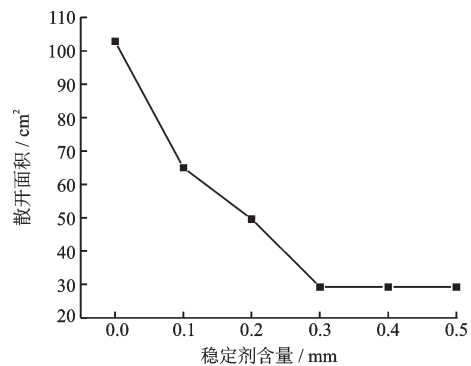


图 3 试样崩解后的散开面积与稳定剂含量的关系

Fig.3 Relationship between dispersion area and stabilizer content after disintegration

土试样,养护 48 h 且浸泡 24 h 后在 200 kPa 轴向应力时的部分剪应力—剪切位移关系,从图中可以看出,试样的剪应力随剪切位移增加快速增加到峰值后逐渐降低到某一值保持稳定,并且随着稳定剂含量的增加,改良砂土试样的剪应力峰值变大。

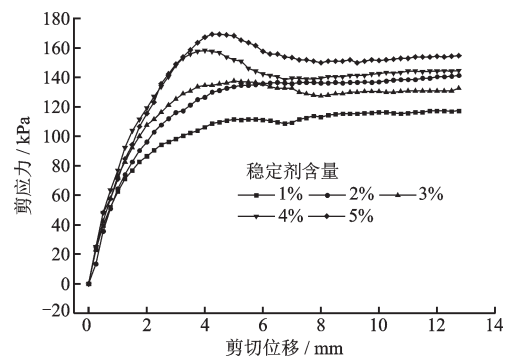


图 4 不同稳定剂含量的剪应力与剪切位移的关系

Fig.4 Relationship between shear stress and shear displacement of sample with different stabilizer contents

### 2.1.3 200 kPa 时剪应力峰值

密度为  $1.4 \text{ g/cm}^3$  的砂土试样养护 48 h、浸泡 24 h 后在轴向应力为 200 kPa 下的剪应力峰值见表 2,改良砂土试样不同含量稳定剂作用下的剪应力峰值分别为 46.65、55.02、63.73、87.10、88.15、97.75、

106.15、133.65、137.49、158.26、169.22 kPa。改良砂土试样的剪应力峰值与稳定剂含量的关系如图5所示,随着稳定剂含量的增加,剪应力峰值逐渐增大。

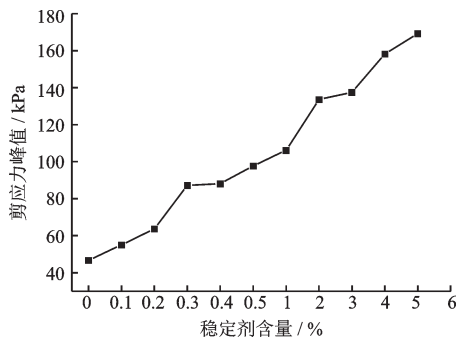


图5 剪应力峰值与稳定剂含量的关系

Fig.5 Relationship between shear strength and stabilizer content

#### 2.1.4 稳定系数

改良砂土试样在不同含量稳定剂下的稳定系数见表2,从表2可以看出,当砂土试样未掺入稳定剂时, $K$ 值为13.78,而当稳定剂含量为5%时, $K$ 的数值达到了100,是素土 $K$ 值的7.26倍。由此可见,高分子稳定剂的含量对改良砂土试样的水稳定性有一定影响,在密度相同的条件下,稳定系数 $K$ 随着稳定剂含量的增加而增大。

因此,改良砂土试样稳定剂含量越高, $K$ 值越大,水稳定性越好。

## 2.2 砂土密度对试样水稳定性影响

通过测定不同密度下改良砂土试样的散开时间、散开面积以及200 kPa时改良砂土试样的剪应力峰值,研究砂土密度对试样水稳定性的影响。

### 2.2.1 试样崩解后的散开面积

表3给出了不同密度下改良砂土试样的散开时间和散开面积。由表3及图6可知,密度对改良砂土试样散开时间影响不大;密度为1.4、1.5、1.6 g/cm<sup>3</sup>时未掺入稳定剂的砂土试样的散开面积分别为102.91、98.47、89.74 cm<sup>2</sup>,散开面积随密度的增加而减小,掺入稳定剂(0.1%、0.2%)后各试样崩解后的散开面积也随砂土密度增加而降低;稳定剂含量超过0.3%以后,不同密度下的改良砂土试样在水中浸泡24 h后保持形态完整,密度的变化对砂土试样的散开面积影响较小。

### 2.2.2 剪应力—位移曲线

稳定剂含量为2%的不同密度的改良砂土试样浸泡24 h后部分剪应力—剪切位移曲线如图7所示

表3 不同密度砂土试样的崩解时间与崩解面积  
Table 3 Disintegration time and disintegration area of sand samples with different densities

编号	稳定剂含量/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	崩解时间/s	崩解后的散开面积/cm <sup>2</sup>
1	0	1.4	2	102.91
2	0.1	1.4	2	64.99
3	0.2	1.4	4	49.61
4	0.3	1.4	∞	29.28
5	0.4	1.4	∞	29.28
6	0.5	1.4	∞	29.28
7	0	1.5	2	98.47
8	0.1	1.5	2	58.71
9	0.2	1.5	4	37.89
10	0.3	1.5	∞	29.28
11	0.4	1.5	∞	29.28
12	0.5	1.5	∞	29.28
13	0	1.6	2	89.74
14	0.1	1.6	2	44.12
15	0.2	1.6	4	36.29
16	0.3	1.6	∞	29.28
17	0.4	1.6	∞	29.28
18	0.5	1.6	∞	29.28

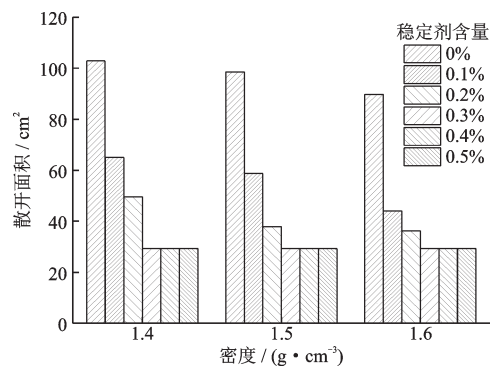


图6 试样崩解后的散开面积与密度的关系

Fig.6 Relationship between dispersion area and density after disintegration

示,由图7可知,稳定剂改良砂土试样的曲线形态与砂土密度有关,密度为1.4、1.5 g/cm<sup>3</sup>砂土试样的剪应力随剪切位移的增加快速增加到峰值后保持稳定;密度为1.6 g/cm<sup>3</sup>砂土试样的剪应力随剪切位移增加快速增加到峰值后逐渐降低到某一值并保持稳定。

### 2.2.3 200 kPa 时剪应力峰值

稳定剂含量2%的改良砂土试样在不同密度下浸泡24 h后,在200 kPa轴向应力下的剪应力峰值

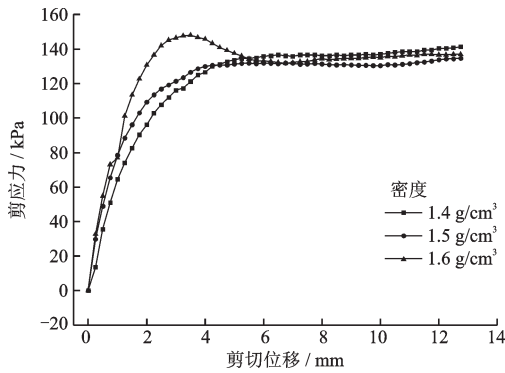


图7 不同密度砂土试样的剪应力与剪切位移关系

Fig.7 The relationship between shear stress and shear displacement of samples with different densities

见表4,密度为1.4、1.5、1.6 g/cm<sup>3</sup>的试样浸泡24h时的剪应力峰值分别为133.658、140.338、148.07 kPa,由图8可知,改良砂土试样的剪应力峰值整体上随砂土密度增加而增加,试样的水稳定性在密度为1.4 g/cm<sup>3</sup>时较弱,在密度为1.5 g/cm<sup>3</sup>与1.6 g/cm<sup>3</sup>时相对较强,因此密度对改良砂土的水稳定性影响表现为随密度的增加而增强。

#### 2.2.4 稳定系数

表4显示出改良砂土试样在养护48 h,浸泡24 h后不同密度下的稳定系数的值,K值随着砂土密度的增加而逐渐增大。

表4 不同密度砂土试样的剪应力峰值与稳定系数

Table 4 Shear strength and stability coefficient of samples with different densities

编号	稳定剂含量/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	剪应力峰值/kPa	稳定系数K
1	2	1.4	133.65	95.13
2	2	1.5	140.33	97.39
3	2	1.6	148.07	100

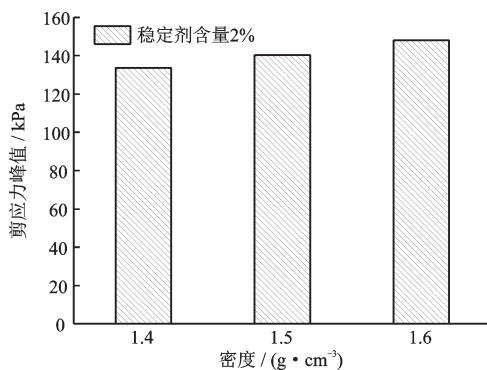
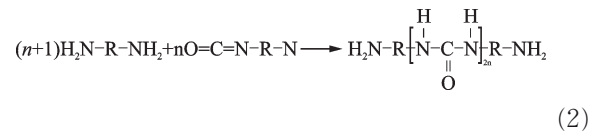
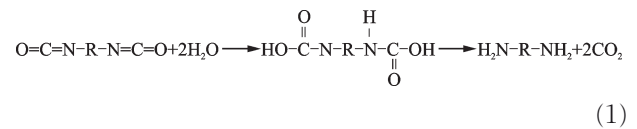


图8 剪应力峰值与密度的关系

Fig.8 Relationship between shear strength and density

### 3 机理分析

聚氨酯型高分子稳定剂的主要成分为一系列预聚体,其特点为端基带有活性异氰酸基,加入土体后稳定剂中的活性官能团可与砂土试样中水发生反应,生成高分子长链,稳定剂与水发生的反应方程式为:



高分子稳定剂可以在颗粒间形成网状膜,填充砂土颗粒间的孔隙,包裹砂土颗粒,提高砂土性能,其改良示意如图9所示,电子显微镜下密度为1.4 g/cm<sup>3</sup>、稳定剂含量为2%砂土颗粒与稳定剂结合的状态如图10所示。砂土中加入稳定剂溶液后,稳定剂溶液能够迅速包裹砂土颗粒并且以较快的速度在砂土颗粒间形成具有一定弹性并且透气的网状膜,填充砂土颗粒间的孔隙,原本松散的砂土在稳定剂作用下形成具有连接力的整体。此外,网状膜与砂土颗粒结合可有效阻挡水分从砂土颗粒间流动,因此砂土的稳定性会得到显著提高。

当稳定剂含量较少时,砂土试样中分布的高分子稳定剂溶液较少,形成的网状膜稳定性较差以及包裹砂土颗粒的数量较少,未被包裹的砂土颗粒受到水的作用容易分散,因此砂土的整体性相对较差,所以在水中浸泡一定时间后的改良砂土试样呈现散开状态;当稳定剂含量较多时,形成的网状膜稳定性越强,包裹的土颗粒数量变多,也可以更好地填充砂土颗粒间的孔隙,使得砂土的整体性得到一定的提高,改良砂土试样受到水的浸泡时不再散开;当稳定剂含量逐渐增加时,其在砂土间形成的

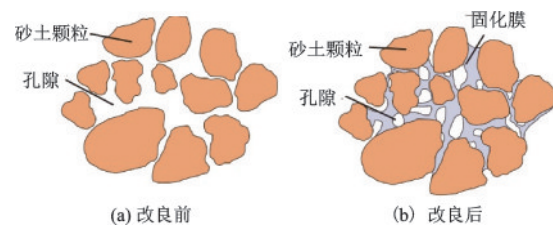


图9 稳定剂改良砂土示意

Fig.9 Schematic drawing of stabilizer reinforced sand

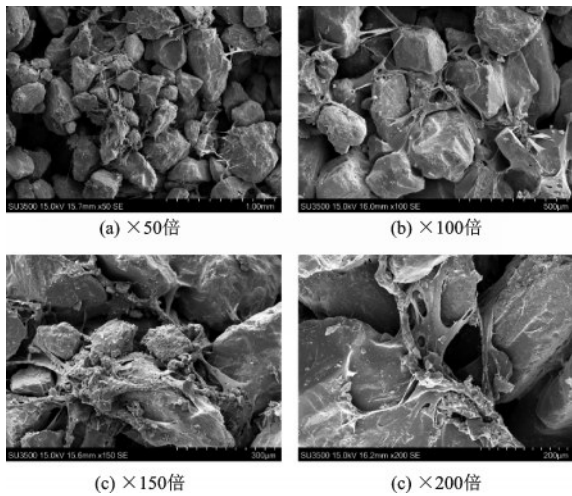


图10 稳定剂改良砂土扫描电镜图

Fig.10 SEM images of stabilizer reinforced sand

网状膜数量就会越多则稳定性越高,因此改良砂土式样的水稳定性越强,使得剪应力峰值逐渐增加,稳定系数 $K$ 值增大。

对于密度较小的砂土试样,砂土结构相对疏松,其孔隙所占的体积较大,稳定剂溶液形成的网状膜不易缠绕包裹砂土颗粒,对改良砂土试样内部颗粒的填充效果也较差,颗粒间的作用力较小,所以改良砂土试样浸泡后容易散开;对于密度较大的砂土试样,颗粒间的排列较为紧密,其孔隙较少,颗粒间的作用力增强,网状膜容易缠绕包裹砂粒,充填砂土孔隙,因此其散开面积相对较小;当改良砂土试样泡水后不再散开时,对于不同密度的砂土试样,密度越大,砂土试样内部孔隙越少,稳定剂溶液形成的网状膜包裹性越好,砂土颗粒间的作用力随密度的增加而逐渐增强,因而其水稳定性随着密度的增加逐渐提高,稳定系数 $K$ 也逐渐变大。

## 4 结论

本文针对高分子稳定剂改良河道岸坡表层砂土的水稳定性问题,采用浸泡崩解测试法和浸泡剪切测试法对改良砂土进行了一系列的试验研究,并对改良砂土的水稳定性进行了较为详细的分析,得出以下结论:

(1)聚氨酯型高分子稳定剂可以在很大程度上提高河道岸坡表层砂土的水稳定性。浸泡崩解测试结果表明改良砂土随着稳定剂含量的提高,试样产生崩解的时间逐渐变长,崩解后的散开面积变小,当稳定剂含量达到0.3%时,试样呈现稳定状

态;当砂土试样密度变大时,崩解后的散开面积逐渐变小。

(2)浸泡剪切测试结果表明改良砂土试样在200 kPa轴向应力下的剪应力峰值整体上随稳定剂含量和密度的增加而增加,同时改良砂土的水稳定系数 $K$ 随着稳定剂含量和砂土密度的增加而增大;当稳定剂含量大于3%时,改良砂土的稳定系数 $K$ 均达到90以上。

(3)高分子稳定剂作为一种土体改良材料,与水混合后加入到砂土中,可填充砂土颗粒间的孔隙,包裹和连接砂土颗粒,形成一个整体的网状膜结构,提高砂土的水稳定性能。研究结果可为河道岸坡有效治理提供一定的参考依据。

## 参考文献:

- [1] 刘洋.砂土的各向异性强度准则:原生各向异性[J].岩土工程学报,2013,35(8):1 526-1 534.  
Liu Y. Principle of anisotropy strength of sand soil: primary anisotropy [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8):1 526-1 534. (in Chinese)
- [2] 朱俊高,史江伟,罗学浩,等.密度对砂土应力应变强度特性影响试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(2):336-341.  
Zhu J G, Shi J W, Luo X H, et al. Experimental study on stress-strain-strength behavior of sand with different densities [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2):336-341. (in Chinese)
- [3] 苏立君,张宜健,王铁行.不同粒径级砂土渗透特性试验研究[J].岩土力学,2014,35(5):1 289-1 294.  
Su L J, Zhang Y J, Wang T X. Investigation on permeability of sands with different particle sizes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5):1 289-1 294. (in Chinese)
- [4] 郑健生,欧树召,陈春林.水土流失地质灾害危险性评估探讨——以广东省德庆县为例[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(3):137-140.  
Zheng J Sh, Ou Sh Zh, Chen Ch L. Preliminary assessment of soil erosion hazard——a case study in Deqing County, Guangdong Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(3):137-140. (in Chinese)
- [5] 闫芙蓉,范文,王勇,等.条形基础砂土地基的破坏模型试验[J].防灾减灾工程学报,2010,30(2):159-164.  
Yan F R, Fan W, Wang Y, et al. Model test on disruptive mode of strip sandy soil foundation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(2):159-164. (in Chinese)
- [6] 王艳.三维土工网防护坡面流水动力学特性试验研究[D].济南:山东大学,2017.

- Wang Y. Experimental study on dynamic characteristics of slope water flow protected by 3d geotechnical network [D]. Jinan: Shandong University, 2017. (in Chinese)
- [7] 钟 峥. 土质边坡新型生态防护结构的研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2013.  
Zhong Zh. Research on new ecological protection structure of soil slope [D]. Changsha: Changsha University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [8] 李亚兰. 黄土边坡坡面稳定性及防治措施研究[D]. 西安:长安大学, 2005.  
Li Y L. Stability and prevention measures of loess slope [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [9] 何小林, 雷 鸣, 何刚雁. 边坡防护技术的研究现状与发展趋势[J]. 科技资讯, 2012(13):57-58.  
He X L, Lei M, He G Y. Research status and development trend of slope protection technology [J]. Science & Technology Information, 2012(13):57-58. (in Chinese)
- [10] 任伟伟, 杜延军, 魏明俐, 等. 固化 Zn、Cl 污染砂土的强度及浸出特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(增1):123-128.  
Ren W W, Du Y J, Wei M L, et al. Strength and leaching properties of solidified/stabilized sandy soil contaminated with zinc and chlorine [J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2016, 46(Sup 1):123-128. (in Chinese)
- [11] 常志璐, 裴向军, 吴梦秋, 等. 植物纤维加筋固化土抗压强度和渗透试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4):912-919.  
Chang Zh L, Pei X J, Wu M Q, et al. Experimental study on compressive strength and permeability of plant fiber reinforced solidified soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4):912-919. (in Chinese)
- [12] 刘 瑾, 张 达, 汪 勇, 等. 高分子稳定剂生态护坡机理及其应用[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(3):420-426.  
Liu J, Zhang D, Wang Y, et al. Reinforcement mechanism of soil slope surface with polymer soil stabilizer and its application [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(3):420-426. (in Chinese)
- [13] 刘 瑾, 施 斌, 姜洪涛, 等. STW 型高分子土壤稳定剂改良粘性土团聚体水稳性实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2):77-80.  
Liu J, Shi B, Jiang H T, et al. Experimental study on the water-stability property of clay aggregates stabilized by STW polymer soil stabilizer [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 36(2):77-80. (in Chinese)
- [14] Liu J, Feng Q, Wang Y, et al. The effect of polymer-fiber stabilization on the unconfined compressive strength and shear strength of sand [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017:1-9.
- [15] 王银梅, 杨重存, 谌文武, 等. 新型高分子材料 SH 加固黄土强度及机理探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14):2 554-2 559.
- Wang Y M, Yang Zh C, Chen W W, et al. Strength characteristics and mechanism of loess solidified with new polymer material SH [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14):2 554-2 559. (in Chinese)
- [16] 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.  
Wang Y M, Chen W W. Experimental study on properties of a new chemical material in sand fixation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(1):108-111. (in Chinese)
- [17] 黄 河, 施 斌, 刘 瑾, 等. STW 型生态土壤稳定剂用于防风固沙试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12):1 900-1 904.  
Huang H, Shi B, Liu J, et al. Experimental study on the application of STW eco-soil stabilizer in wind-resistant sand fixation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12):1 900-1 904. (in Chinese)
- [18] 黄 河, 施 斌, 刘 瑾, 等. STW 型生态土壤稳定剂改性土强度试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(1):87-90.  
Huang H, Shi B, Liu J, et al. Experimental study on modified soil strength with STW eco-soil stabilizer [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(1):87-90. (in Chinese)
- [19] 陈峰军, 施 斌, 黄 河, 等. 生态土壤稳定剂对土质边坡稳定性影响的数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(3):302-306.  
Chen F J, Shi B, Huang H, et al. Numerical analysis of effects of eco-soil stabilizer on stability of soil slope [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(3):302-306. (in Chinese)
- [20] Mohsin M A, Attia N F. Inverse emulsion polymerization for the synthesis of high molecular weight polyacrylamide and its application as sand stabilizer [J]. International Journal of Polymer Science, 2015, 2015:1-10.
- [21] Collins R, Zhang M, Zhang X, et al. Evaluation of geofibers and nontraditional liquid additives on erodible slopes in Interior Alaska [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2015, 43(5):412-423.
- [22] Ekwue E I, Birch R, Bethel S. Effect of soil on wash erosion by overland flow of some Trinidadian soils [J]. Biosystems Engineering, 2011, 108(2):87-94.
- [23] Rezaeimalek S, Nasouri A, Huang J, et al. Comparison of short-term and long-term performances for polymer-stabilized sand and clay [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2017, 4(2):145-155.
- [24] 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, 146:210-220.

(本文责编:池营营)