

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.014

## 高分子固化剂改良砂土的渗透特性试验研究\*

王颖, 刘瑾, 王琼亚, 孔繁轩, 汪勇, 李鼎

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 211100)

**摘要:** 对高分子固化剂改良后的砂土进行常水头渗透试验和变水头渗透试验, 研究高分子固化剂浓度、养护时间以及砂土干密度对砂土渗透特性的影响, 并结合试验结果与扫描电镜深入分析了高分子固化剂改良砂土的机理。研究表明: 固化剂浓度、养护时间和砂土干密度对改良后砂土的渗透特性有显著影响。随固化剂浓度、养护时间和干密度增加, 砂土的出水时间变长, 渗透系数快速降低, 相对渗透阻力系数急速变大; 固化剂浓度和养护时间对改良砂土渗透特性影响最为显著的范围分别为1%~5%和养护3~12 h; 高分子固化剂在砂粒之间形成高分子膜包裹、连接砂粒, 填充砂土空隙, 减小砂土空隙, 进而降低砂土渗透特性。

**关键词:** 地质工程; 高分子固化剂; 砂土; 渗透特性; 机理分析

**中图分类号:** TU443   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0243-08

## Study on the Permeability Characteristics of Sand Reinforced with Polymer Soil Stabilizers

WANG Ying, LIU Jin, WANG Qiongya, KONG Fanxuan, WANG Yong, LI Ding  
(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** The constant head permeability test and variable head permeability tests were carried on polymer reinforced sand to study the influence of polymer concentration, density and curing time on the permeability of reinforced sand. The reinforcement mechanism of polymer was analyzed in depth with the test results and SEM. The results show that the polymer concentration, curing time and density have a significant influence on the permeability of the reinforced sand. With the polymer concentration, density and curing time increasing, the initial time of outflow water become longer, the permeability coefficient decreases rapidly, and relative permeability resistance coefficient of the sand increases rapidly. The most significant effects of the polymer concentration and curing time on the permeability of the reinforced sand are 1%-5% and 3~12 h. The polymer membrane in the sand forms a stable structure through wrapping and connecting sand particles, so as to enhance the bond strength between sand particles, and reduce the void ratio, thereby improving the permeability of sand.

**Keywords:** geological engineering; polymer soil stabilizers; sand; penetration characteristics; mechanism analysis

\* 收稿日期: 2019-01-18; 修回日期: 2019-03-06

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)、中央高校基本科研业务费(2016B05914; 2017B666X14)资助

作者简介: 王颖(1994-), 男, 硕士研究生。主要从事环境地质工程研究。Email: hhuwy1@163.com

## 引言

砂土具有结构松散、强度低、渗透性好、饱和易液化等特点,其工程特性无法满足路基工程、边坡工程等的稳定性要求。特别是在边坡工程中,砂质边坡在各种风化作用下,边坡表面整体性受到破坏,严重影响到边坡的稳定性。而降雨入渗对边坡的侵蚀作用更是对边坡的稳定性起到显著影响。

为了保护坡面的整体性,工程中常采用铺草皮、加格栅和喷散混凝土等措施。化学加固技术作为一种有效的加固方法已经被广泛应用于岩土工程中。常用的化学加固剂包括水泥、石灰、粉煤灰等,这类传统的添加剂可以显著地改良砂土的工程特性<sup>[1-4]</sup>,但大部分传统的化学添加剂会改变土壤性质从而引发一系列环境问题,如造成水体污染,影响植物生长等<sup>[5-6]</sup>。随着对化学加固技术研究的深入,高分子固化剂作为一种新型土体加固材料,具有改良效果稳定,生态环保,运输施工方便等优点被国内外学者广泛关注和研究。S.Rezaeimalek等<sup>[7]</sup>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,提出在固定聚合物水比下,随聚合物含量的增加,砂土样的强度呈直线增加;A. Ate等<sup>[8]</sup>通过试验提出了添加丙烯酸聚合物和水泥混合物改善砂土特性的措施,发现该措施可以有效提高砂土抗液化能力和无侧限抗压强度;王银梅等<sup>[9-13]</sup>通过一系列试验研究自主研制了SH固沙剂,该固沙剂具有良好的抗冻融和老化性能,可以显著增强黄土强度,并对加固机理进行了深入分析。冯浩等<sup>[14]</sup>、樊恒辉等<sup>[15-16]</sup>将HEC、AAM以及MBER固化剂与黄土进行混合,通过室内降雨试验,探讨加固后土体的集流效率和性能的变化;单志杰等<sup>[17]</sup>研究了EN-1型离子固化剂在黄土中的作用效果,指出此种固化剂可以降低土壤中水分的有效性;张伟锋等<sup>[18]</sup>使用HEC固化剂对黄土进行土体加固的研究,通过不同条件下的直接剪切、无侧限抗压强度、渗透等实验对加固后黄土的性质进行研究。张丽萍<sup>[19]</sup>研究了CON-AID、LUKANG、EN-1和SSA四种土壤固化剂对黄土力学性质的影响,分析了影响黄土边坡坡面稳定的因素,同时对最优的固化剂类型、最佳含量、养护时间进行分析。这些研究成果表明高分子固化剂作为一种土体加固材料可以很好地改良砂土的工程特性,满足工程需求。

本文以新型高分子固化剂作为土体加固材料,通过室内常水头试验和变水头试验,研究了固化剂浓度,养护时间和砂土干密度对改良砂土渗透特性的影响,并结合微观扫描电镜对固化剂的加固机理进行深入分析,为砂土地区工程加固提供合理有效的理论依据。

## 1 试验材料

本文采用的高分子固化剂为聚氨酯型固化剂,聚氨酯型固化剂在常温时,呈浅黄色,是一种黏稠状透明液体,稍有芳香烃气味,可以与水以任意比例互溶配制成指定浓度的溶液。该固化剂与水反应能够形成具有弹性的胶状体。聚氨酯型高分子固化剂的基本物理性质见表1。

表1 聚氨酯型固化剂基本物理性质

Table.1 Physical properties of polyurethane curing agen

状态	颜色	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	黏度/ ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	固含量/ %	凝固时间/ s
液体	淡黄色	1.18	650~700	85%	30~1 800

本研究采用的砂土取自江苏省南京市江宁区,砂土的粒径分布曲线如图1所示。砂土的最大、最小干密度分别为1.66和1.35  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,砂土的有效粒径 $d_{10}$ 为0.14 mm,不均匀系数 $C_u$ 为2.57,曲率系数 $C_c$ 为1.05,属于级配不良好砂。

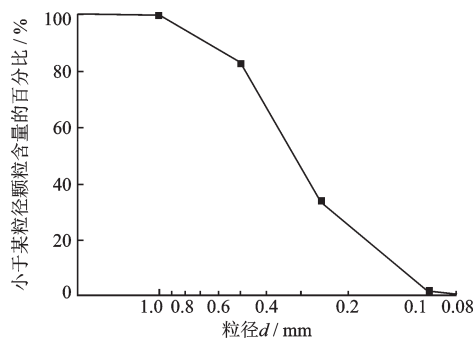


图1 砂土的粒径分布曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of sand

## 2 试验方案

为研究高分子固化剂浓度、试样养护时间和密度对砂土渗透特性的影响,本文对改良砂土进行了常水头和变水头渗透试验。

## 2.1 常水头渗透试验

采用 TST-70 型土壤渗透仪对改良砂土进行常水头渗透试验。取 3 250 g 风干后的砂土,并将其均分为 13 份,每份约 250 g;将分好的砂土逐层放入渗透仪中并击实,饱和,重复至第 11 层;对每层砂土进行击实时控制该层厚度约为 2.22 cm。再将高分子固化剂与水配制成 50 mL 浓度为 0%、1%、3%、5%、7%、9% 的溶液,并与最后的两份砂土进行混合,搅拌均匀后,放入渗透仪中并击实,厚度约为 4.44 cm,密度为 1.44 g/cm<sup>3</sup>。最后在试样与渗透仪内壁接触处用玻璃胶密封,防止水流从渗透仪内壁渗漏。将制备好的试样在室温条件下分别养护 0、3、6、12、24 h 后进行常水头渗透试验。在对不同密度砂土进行渗透试验时,将最后两份砂土用木锤分别击实到 1.40、1.53、1.56 和 1.61 g/cm<sup>3</sup>,单独养护 6 h 后进行渗透试验。在试验过程中,测量水流从试样表面流到试样底部的时间即渗透仪出水孔的初次出水时间,并定义为出水时间;待水流稳定后,测定试样的渗透系数  $K$ 。

J. Liu 等<sup>[20]</sup>提出将相对渗透阻力系数 ( $R$ ) 作为评价改良砂土渗透特性的指标并给出定义:  $R=K_u/K_r$ ,其中  $K_u$  (cm/s) 为未改良砂土试样的渗透系数,  $K_r$  (cm/s) 为改良砂土试样的渗透系数,改良砂土的  $R$  值越大说明改良后砂土的抗渗性能越好。

## 2.2 变水头渗透试验

变水头试验用于测定渗透系数较小的细粒土的渗透系数。由于高分子固化剂改良后的砂土的渗透特性有显著改善,特别是加入浓度较高的固化剂溶液改良后砂土的渗透系数用常水头渗透仪已无法测量。因而对改良砂土进行变水头渗透试验以精确测量渗透系数。由常水头试验结果可知,当试样的密度达到 1.56 g/cm<sup>3</sup>,固化剂含量达到 5% 时,其渗透系数  $K$  已经达到很小或已经无法使用常水头试验测得。因此,在变水头试验中,试样的密度分别控制为 1.40、1.53、1.56 和 1.61 g/cm<sup>3</sup>,固化剂的含量定为 5%、7% 和 9%,养护 6 h 后进行变水头渗透试验。本试验的试样采用压制方法进行制备。首先取适量风干过筛后的砂土,接着将其与配制好的一定浓度的固化剂溶液混合后搅拌均匀,放入变水头渗透试验模具内,用静压法将其压到试验所需的密度,再将试样放在 20 °C 的恒温箱中养护 6 h 后

进行变水头渗透试验。变水头渗透试验中采用 TST-55 型土壤渗透仪进行试验。

## 3 结果分析

### 3.1 常水头渗透试验结果与分析

常水头渗透试验结果见表 2。由于砂土具有结构松散,黏聚力小等特点,未改良砂土试样表面的水流立即渗入试样底部,渗透系数较大,并且养护时间对出水时间和渗透系数的影响较小。未改良砂土试样在养护 0、3、6、12、24 h 后的出水时间约为 2~3 s,渗透系数约为  $1.70 \times 10^{-2}$  cm/s。固化剂改良砂土试样的防渗透特性有显著提高,不同浓度固化剂改良砂土在不同养护时间下的出水时间与固化剂浓度的关系如图 2 所示。结合表 2 与图 2 可知,改良砂土试样的出水时间随养护时间增加而变长,5% 浓度固化剂改良砂土在养护 0、3、6、12、24 h 下的出水时间分别为:0.08、2.25、5.03、6.10、30.17 min。改良砂土试样的出水时间随固化剂浓度增加而变长,0%、1%、3%、5%、7%、9% 浓度固化剂改良砂土试样养护 3 h 后的出水时间分别为:0.03、0.13、1.37、2.25、37.17、66.67 min。当试样的养护时间超过 6 h,固化剂浓度对改良砂土出水时间的影响更显著。对于 7%、9% 浓度固化剂改良砂土试样在养护时间超过 6 h 以后,出水孔在试验过程中不出水,这是因为固化剂改良砂土相当于具有一定厚度的低渗透性的保护层,覆盖在试样表面阻碍了水流的向下渗入。固化剂改良砂土在不同养护时间下的渗透系数与固化剂浓度的关系如图 3 所示,由表 2 和图 3 可知,改良砂土的渗透系数随养护时间

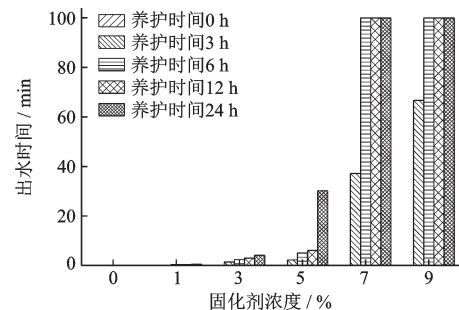


图 2 固化剂改良砂土试样的出水时间与固化剂浓度的关系

Fig.2 The relationship between the initial time of outflow water of reinforced samples and the concentration of polymer

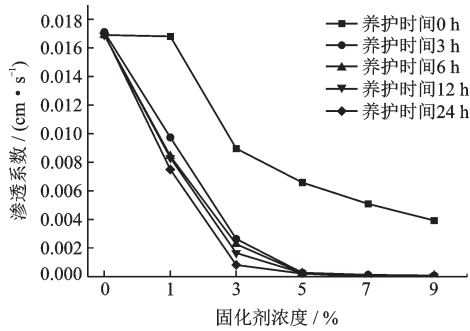


图3 固化剂改良砂土试样的渗透系数与固化剂浓度的关系  
Fig.3 The relationship between permeability coefficient of reinforced samples and the concentration of polymer

和固化剂浓度增加而逐渐降低。5%浓度固化剂改良砂土在养护0、3、6、12、24 h下的渗透系数分别为： $6.58 \times 10^{-3}$ 、 $2.62 \times 10^{-4}$ 、 $2.4 \times 10^{-4}$ 、 $2.37 \times 10^{-4}$ 、 $2.06 \times 10^{-4}$  cm/s，逐渐稳定于 $10^{-4}$ cm/s数量级。0%、1%、3%、5%、7%、9%浓度固化剂改良砂土试样养护3 h后的渗透系数分别为： $1.71 \times 10^{-2}$ 、 $9.74 \times 10^{-3}$ 、 $2.64 \times 10^{-3}$ 、 $2.62 \times 10^{-4}$ 、 $1.16 \times 10^{-4}$ 、 $7.46 \times 10^{-5}$  cm/s。当7%、9%浓度固化剂改良砂土试样在养护时间超过6 h以后，试样的渗透系数已无法测量，这表明改良砂土试样的渗透系数很小，几乎为0 cm/s，固化剂改良砂土几乎不透水。

表2 常水头渗透试验结果

Table 2 Results of constant head permeability test

固化剂浓度/%	养护时间/h									
	0		3		6		12		24	
	出水时 间/min	K/ (cm·s <sup>-1</sup> )	出水时 间/min	K/ (cm·s <sup>-1</sup> )	出水时 间/min	K/ (cm·s <sup>-1</sup> )	出水时 间/min	K/ (cm·s <sup>-1</sup> )	出水时 间/min	K/ (cm·s <sup>-1</sup> )
0	0.03	$1.69 \times 10^{-2}$	0.03	$1.7 \times 10^{-2}$	0.05	$1.69 \times 10^{-2}$	0.05	$1.69 \times 10^{-2}$	0.05	$1.70 \times 10^{-2}$
1	0.03	$1.68 \times 10^{-2}$	0.13	$9.74 \times 10^{-3}$	0.42	$8.42 \times 10^{-3}$	0.45	$8.31 \times 10^{-3}$	0.58	$7.49 \times 10^{-3}$
3	0.07	$8.96 \times 10^{-3}$	1.37	$2.64 \times 10^{-3}$	2.38	$2.27 \times 10^{-3}$	3.00	$1.65 \times 10^{-3}$	4.13	$8.19 \times 10^{-4}$
5	0.08	$6.58 \times 10^{-3}$	2.25	$2.62 \times 10^{-4}$	5.03	$2.40 \times 10^{-4}$	6.10	$2.37 \times 10^{-4}$	30.17	$2.06 \times 10^{-4}$
7	0.10	$5.09 \times 10^{-3}$	37.17	$1.16 \times 10^{-4}$	∞	—	∞	—	∞	—
9	0.13	$3.92 \times 10^{-3}$	66.67	$7.46 \times 10^{-5}$	∞	—	∞	—	∞	—

不同浓度固化剂改良砂土在不同养护时间下的R值整理如图4所示。结合表2、图4可知，R值随养护时间和固化剂浓度的增加而增加，并且固化剂浓度的影响更加明显。对于1%浓度固化剂改良砂土试样的R值基本相同，约为1.00~2.30；当固化剂浓度达到3%及以上时，改良砂土的养护时间越长，R值越大；当固化剂浓度达到7%及以上，改良砂土的养护时间超过6 h以后，R值均为∞，这表明改良砂土试样的R值基本为0，固化剂改良砂土几乎不

透水。

图5为不同密度砂土的渗透系数和相对渗透阻力系数与固化剂浓度之间的关系。从图6和表3可以看出，当加入的固化剂浓度达到9%时，每一个密度砂土的渗透系数都为0 cm/s，且当固化剂浓度达到7%时，密度超过1.40 g/cm<sup>3</sup>的试样渗透系数也为0 cm/s，均可以达到良好的隔水效果。从图6可以看出，当试样的密度保持一定时，改良砂土的K值随着固化剂浓度的升高而降低，而相对渗透阻力系

表3 不同密度砂土常水头渗透试验结果

Table 3 Results of constant head penetration test on different density sand soil

固化剂浓度/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )							
	1.40		1.53		1.56		1.61	
	K/(cm·s <sup>-1</sup> )	R	K/(cm·s <sup>-1</sup> )	R	K/(cm·s <sup>-1</sup> )	R	K/(cm·s <sup>-1</sup> )	R
0	$1.68 \times 10^{-2}$	1.00	$1.54 \times 10^{-2}$	1.00	$1.43 \times 10^{-2}$	1.00	$1.32 \times 10^{-2}$	1.00
1	$1.29 \times 10^{-2}$	1.30	$1.02 \times 10^{-2}$	1.51	$9.20 \times 10^{-3}$	1.55	$8.50 \times 10^{-3}$	1.55
3	$5.50 \times 10^{-3}$	3.05	$4.30 \times 10^{-3}$	3.58	$3.00 \times 10^{-3}$	4.77	$1.80 \times 10^{-3}$	7.33
5	$2.60 \times 10^{-3}$	6.46	$1.70 \times 10^{-3}$	9.06	$9.00 \times 10^{-4}$	15.89	$3.00 \times 10^{-4}$	44.00
7	$5.00 \times 10^{-4}$	33.6	0	∞	0	∞	0	∞
9	0	∞	0	∞	0	∞	0	∞

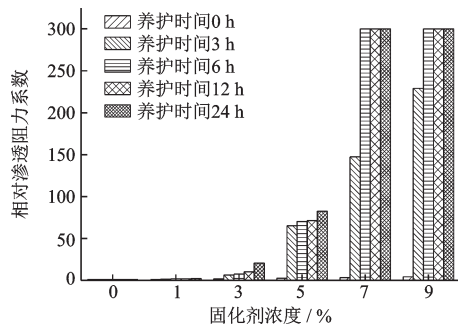


图4 不同养护时间下  $R$  与固话剂浓度之间的关系

Fig.4  $R$  value of reinforced sand with different concentration of polymer at different curing time

数  $R$  与之对应的是随固话剂浓度的加大而增加。从图6还可以看出,当试样中加入的固话剂浓度一

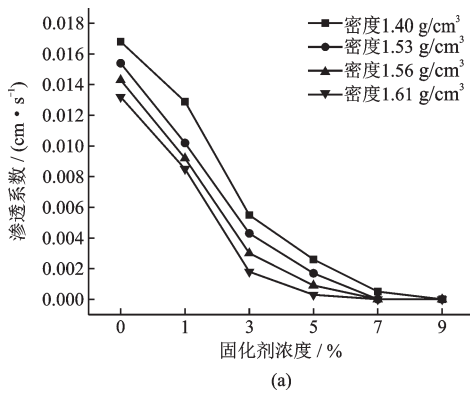


图5 不同密度下  $K$  和  $R$  与固话剂浓度之间的关系

Fig. 5 The relationship of  $K$  and  $R$  with density at different concentration of solidifying stabilizers

定时,试样的渗透系数  $K$  随着密度的增大而减小,而相对渗透阻力系数  $R$  则相应的增大,其中试样密度从  $1.40 \text{ g/cm}^3$  增加到  $1.53 \text{ g/cm}^3$ ,渗透系数降低幅度最大。

不同密度试样中加入5%浓度固话剂在砂土中形成的固话层如图6所示。由图6可知,砂土中固话层厚度和完整程度随着密度的升高而增加。密度为  $1.40$ 、 $1.53$  和  $1.56 \text{ g/cm}^3$  试样固话层的状态分别是疏松,较完整和完整。其中,当试样的密度达到  $1.61 \text{ g/cm}^3$  时,砂土中形成的固话层保持得相当完整,已经可以看作是相对隔水层,其渗透性能已经完全不是砂土的特性,而更趋向与黏土的性质,可以看作是相对隔水层。

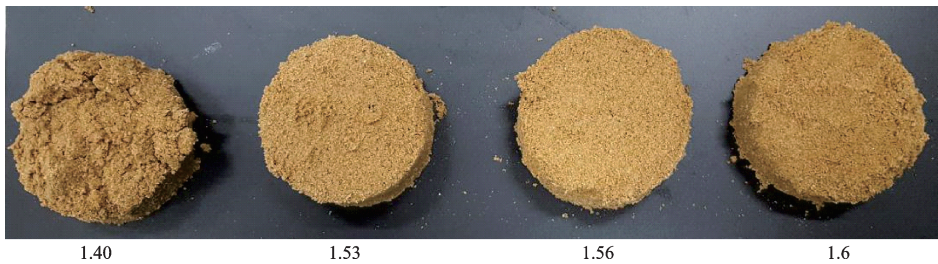
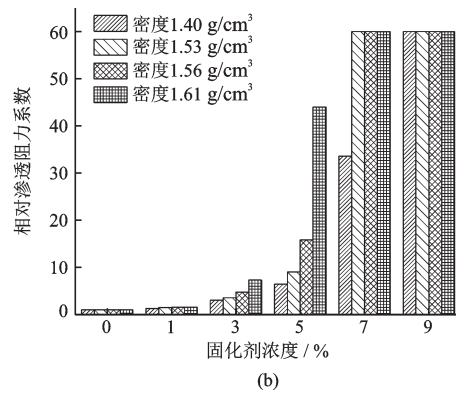


图6 固话剂含量为5%的不同密度试样的固话层

单位:  $\text{g/cm}^3$

Fig.6 Curing layer of different density specimens with 5% solidifying stabilizers

### 3.2 变水头渗透试验结果与分析

本次实验中设置了密度分别为  $1.40$ 、 $1.53$ 、 $1.56$  和  $1.61 \text{ g/cm}^3$ ,高分子固话剂浓度分别为5%、7%和9%的样品,养护6h后,测定每个试样渗透系数  $K$ ,具体实验得到的渗透系数见表4。

不同密度状态下砂土渗透系数  $K$  随固话剂浓度间的关系如图7所示。结合表3、图7可知,变水头实验中,渗透系数  $K$  的变化情况与常水头实验中

表4 变水头渗透试验结果

Table 4 The results of variable head permeability test

单位:  $\text{cm/s}$

编号	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	固话剂浓度 / %		
		5	7	9
1	1.40	$2.42 \times 10^{-3}$	$4.83 \times 10^{-4}$	$2.36 \times 10^{-4}$
2	1.53	$1.68 \times 10^{-3}$	$2.68 \times 10^{-4}$	$1.06 \times 10^{-4}$
3	1.56	$4.98 \times 10^{-4}$	$1.38 \times 10^{-4}$	$9.32 \times 10^{-5}$
4	1.61	$1.88 \times 10^{-4}$	$7.36 \times 10^{-5}$	$5.54 \times 10^{-5}$

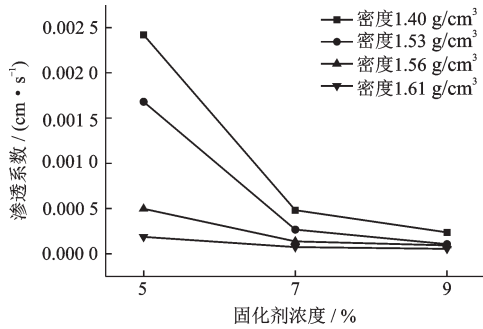


图7 不同密度下渗透系数K随固化剂含量变化的曲线  
Fig.7 The relationship between the permeability coefficient K and the content of the curing agent under different density

一致,即:试样在某个密度状态其K值随着固化剂含量的升高而降低,固化剂浓度从5%增加到7%,砂土的渗透系数减小了一个数量级;当试样中固化剂浓度一定时,试样的渗透系数K随着密度的增大而减小。由表3可见,加入5%、7%、9%固化剂浓度砂土密度从1.40增加到1.61 g/cm<sup>3</sup>分别降低了92.23%、84.76%和76.53%。对比两种实验的结果可以知道,当试样的密度达到1.56g/cm<sup>3</sup>,固化剂含量达到5%时,其渗透系数的大小已经低于5×10<sup>-5</sup> cm/s,对外表现出的水理性质已经不再是砂土的性质,反而更加的趋向于黏性土。

图8为加入不同固化剂浓度砂土的渗透系数相对降低量与密度之间的关系。从图8可以看出,固化剂浓度为5%时,砂土的渗透系数相对降低量随密度的变化最大,且随密度的增大,砂土渗透系数相对降低量一直保持增大趋势,其中密度从1.56g/cm<sup>3</sup>增加到1.61 g/cm<sup>3</sup>,砂土的渗透系数相对降低量最大,达到2.23×10<sup>-3</sup>。而对于加入7%和9%固化剂浓度的砂土,其相对降低量随密度的增加变化很小,几乎保持的是线性减小趋势,表明当砂土中加

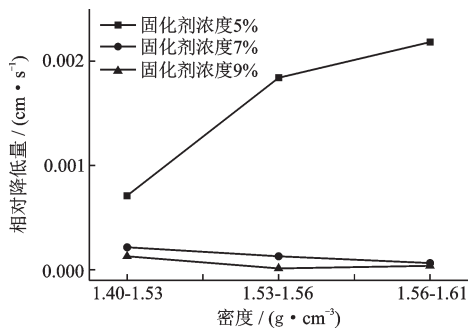


图8 渗透系数相对降低量与密度之间的关系  
Fig.8 Relation between the relative decrease of permeability coefficient and density

入的固化剂浓度达到5%后,砂土的渗透系数已经减小到较小数值,固化剂浓度进一步增加对砂土的渗透系数减小量影响很小。且砂土密度进一步的增大对砂土渗透性能的改变也开始减弱。

#### 4 改良机理分析

聚氨酯型高分子固化剂含有大量高分子长链,长链上含丰富的官能团(-NCO)和亲水基团,可与任意比例的水配制成固化剂溶液。当配制好的固化剂溶液与砂土混合时,一部分固化剂溶液填充砂土空隙,其它的包裹砂土颗粒。与此同时,长链上的官能团与水发生化学反应生成高分子膜,在砂土颗粒和高分子链之间形成一种物理-化学连接。通过这种物理-化学连接,高分子膜缠绕、包裹、连接砂粒,在砂土中形成一种弹性黏膜结构。5%浓度固化剂改良砂土的扫描电镜如图9所示,从图9中可以明显看出,高分子膜缠绕、包裹、连接砂粒,填充砂土空隙,在砂土中形成一种稳定的结构,从而很好地增强砂粒间的黏结力,减小砂土空隙。

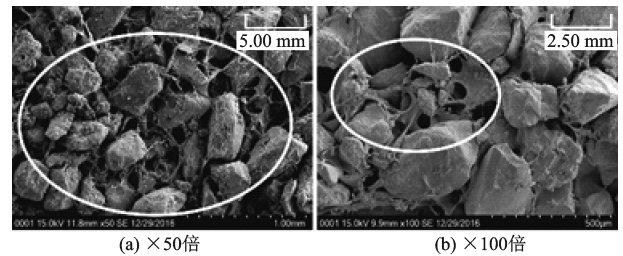


图9 5%固化剂改良砂土的扫描电镜  
Fig.9 SEM of sand reinforced with 5% polymer.

高分子固化剂改良砂土的关键在于高分子膜与砂粒形成的稳定结构,而固化剂浓度和养护时间是两个重要的影响因素。形成这种稳定结构需要一定的养护时间<sup>[21]</sup>,因此,随养护时间增加,改良砂土试样的出水时间逐渐变长,相对渗透阻力系数快速增加,渗透系数快速降低并趋于稳定,当养护时间超过12 h,改良砂土的渗透特性基本稳定(表2、3和图2~6)。并且,在养护时间为3~12 h内,养护时间对改良砂土渗透特性的影响最为明显,如图7所示。

固化剂溶液浓度越高,将会有更多的高分子膜缠绕,包裹,连接砂粒,从而在砂土中形成的这种稳定结构更加牢固,因此砂土颗粒间的砂土中的空隙越小,黏结力越强。当试样上部有水压时,未加固的

试样由于结构松散,颗粒间黏结力小,水流很快向试样下部渗透,如图10(a)所示;而固化剂改良的试样由于砂土颗粒和砂土空隙被高分子膜包裹和填充,水流慢慢向试样下部浸透如图10(b)所示。随着固化剂浓度增加,出水时间变长,渗透系数变小,相对渗透阻力系数越大(表2、3和图2~6)。当固化剂浓度达到7%以上时,常水头试验试样上部的改良砂土阻隔了水流向下渗透,出水孔几乎不出水。此时变水头的渗透系数降到 $10^{-5}$ cm/s,远低于一般砂土的渗透系数。并且在固化剂浓度为1%~5%范围内,固化剂浓度对改良渗透特性的影响最为显著,如图7所示。

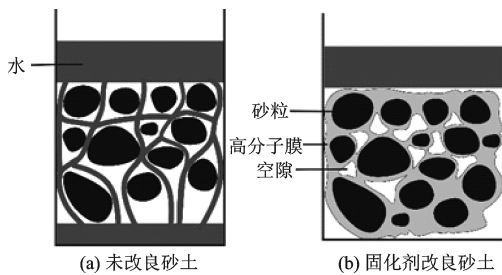


图10 砂土渗透结构示意图

Fig.10 A schematic diagram of sand permeability

由图5可知,砂土密度越大,砂土的渗透性能越弱。随着砂土密度的增加,砂粒之间的距离减小,连接更为紧密,砂土中较少的孔隙,与固化剂在砂土中形成的固化膜共同作用,进一步填充砂土中的孔隙,从而渗透系数逐渐减小,最终形成相对隔水层,达到较好的抗渗效果。

## 5 结论

以新型高分子固化剂作为土体加固材料,通过室内常水头试验和变水头试验,研究了固化剂浓度和养护时间对改良砂土渗透特性的影响,并结合微观扫描电镜对固化剂的加固机理进行深入分析,得到以下结论:

(1) 固化剂浓度对改良砂土渗透特性有显著影响,随着固化剂浓度增加,改良砂土的出水时间变长,渗透系数快速降低,相对渗透阻力系数急速变大。在1%~5%范围内,固化剂浓度对改良渗透特性的影响最为显著。

(2) 随着密度的增加,砂土的渗透系数保持减小趋势,密度为 $1.61 \text{ g/cm}^3$ 时渗透性能最差。

(3) 养护时间对改良砂土渗透特性有明显影

响,随着养护时间增加,改良砂土试样的出水时间逐渐变长,相对渗透阻力系数快速增加,渗透系数快速降低并趋于稳定。在养护3~12h时,养护时间对改良砂土渗透特性的影响最为明显。

(4) 固化剂溶液与砂土混合时,通过与水的反应,高分子膜缠绕、包裹、连接砂粒,填充砂土空隙,在砂土中形成一种稳定结构,从而很好地增强砂粒间的黏结力,减小砂土空隙,进而改善砂土的渗透特性。

## 参考文献:

- [1] Sharma R. Laboratory study on sustainable use of cement-fly ash-polypropylene fiber-stabilized dredged material [J]. *Environment Development and Sustainability*, 2018, 20(5): 2 139-2 159.
  - [2] Cepuritis R, Mørtzell E. Possibilities of improving crushed sand performance in fresh concrete by washing: A case study [J]. *Materials & Structures*, 2016, 49(12): 1-16.
  - [3] Murphy R J, Lenhart J J, Honeyman B D. The sorption of thorium (IV) and uranium (VI) to hematite in the presence of natural organic matter [J]. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 157(1-3): 47-62.
  - [4] Latifi N, Rashid A S A, Siddiqua S, et al. Micro-structural analysis of strength development in low- and high swelling clays stabilized with magnesium chloride solution—a green soil stabilizer [J]. *Applied Clay Science*, 2015, 12(118):195-206.
  - [5] Chang I, Cho G C. Strengthening of korean residual soil with  $\beta$ -1, 3/1, 6-glucan biopolymer [J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 5(30): 30-35.
  - [6] Joel M, Agbede I O. Mechanical-cement stabilization of laterite for use as flexible pavement material [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 22(2): 146-152.
  - [7] 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(8):201-220.
  - [8] Ate A. The Effect of polymer-cement stabilization on the unconfined compressive strength of liquefiable soils [J]. *International Journal of Polymer Science*, 2013: 1-8.
  - [9] 王银梅, 孙冠平, 谌文武, 等. SH固沙剂固化沙体的强度特征 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(增2): 2 883-2 887.
- Wang Y M, Sun G P, Chen W W, et al. Strength characteristics of SH sand-fixing agent cured sand [J]. *Chi-*

- nese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (Sup2): 2 883-2 887. (in Chinese)
- [10] 丁 亮. SH化学固沙材料固化体的工程性质研究[D]. 兰州:兰州大学, 2004.  
Ding L. Study on the engineering properties of the solidified body of SH chemical sand fixing material[D]. Lanzhou :Lanzhou University, 2004. (in Chinese)
- [11] 王银梅, 韩文峰, 谌文武. 新型高分子材料固沙抗冻性能试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4):145-148.  
Wang Y M, Han W F, Chen W W. Experimental study on the frost resistance of new polymer materials [J]. Journal of Geological Disasters and Prevention in China, 2006, 17(4):145-148. (in Chinese)
- [12] 王银梅, 韩文峰, 谌文武, 等. 新型高分子固化材料耐老化性能的试验研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(3):318-322.  
Wang Y M, Han W F, Chen W W. et al. Experimental study on the aging resistance of a new type of polymer solidified material [J]. The Journal of Engineering Geology, 2004, 12(3):318-322. (in Chinese)
- [13] 王银梅, 谌文武, 韩文峰. SH固沙机理的微观探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(4):650-654.  
Wang Y M, Chen W W, Han W F. Microcosmic discussion on sand fixing mechanism of SH[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4):650-654. (in Chinese)
- [14] 冯 浩, 吴普特, 彭洪涛. HEC和AAM添加剂对提高黄土集流效率的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(3):28-31.  
Feng H, Wu P T, Peng H T. The experimental study on improving the efficiency of loess collection by HEC and AAM additives[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(3):28-31. (in Chinese)
- [15] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特, 等. 土壤固化剂集流面不同施工工艺比较[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 73-77.  
Fan H H, Gao J E, Wu P T, et al. Comparison of different construction techniques of soil curing agent [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10):73-77. (in Chinese)
- [16] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特, 等. MBER土壤固化剂集流场的施工工艺研究[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3):56-59.  
Fan H H, Gao J E, Wu P T, et al. Study on the construction technology of MBER soil curing agent[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(3):56-59. (in Chinese)
- [17] 单志杰. EN-1离子固化剂加固黄土边坡机理研究[D]. 中国科学院, 2010.  
Shan Zh J. Study on the mechanism of EN-1 ion stabilizer for loess slope reinforcement [D]. China Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [18] 张伟锋, 刘清秉, 蔡松桃. 用HEC固化剂加固黄土的试验研究[J]. 人民长江, 2009, 40(3):56-59.  
Zhang W F, Liu Q B, Cai S T. Experimental study on strengthening loess with HEC curing agent[J]. Yangtze River, 2009, 40(3):56-59. (in Chinese)
- [19] 张丽萍. 黄土边坡坡面稳定及防治技术研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2009.  
Zhang L P. Study on stability and control technology of slope surface of loess slope [D]. Xianyang: Northwest Agriculture and Forestry University, 2009. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] 刘 瑾. 新型高分子土壤稳定剂的研制及其应用研究[D]. 南京:南京大学, 2011.  
Liu J. Experimental study on development and application of polymer soil stabilizers [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)