

水溶性稳定剂改良砂土的水理特性研究

邵 勇^{1,2*}, 刘 瑾³, 杭 丹², 孙少锐³, 王 颖³, 魏继红³

(1. 江苏省水利工程建设局, 江苏 南京 210085; 2. 江苏省太湖治理工程建设管理局, 江苏 常州 213000;
3. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要:针对砂土结构松散、易冲刷等特性,采用水溶性稳定剂对其改良。通过常水头、变水头渗透试验和保水性试验,研究了不同稳定剂含量改良后砂土的渗透特性和保水特性,并根据扫描电镜对其改良机理进行了分析。结果表明,稳定剂的含量和试样密度对改良砂土的水理特性具有重要影响;在常水头渗透试验中,改良砂土的初始出水时间随稳定剂含量和密度的增加逐渐减小,且当稳定剂含量达到3%后,改良砂土不再有水流出;改良砂土的渗透系数随试样密度的增加显著减小,且与稳定剂含量几乎保持指数减小关系,当稳定剂含量达到3%后,渗透系数趋近于0;稳定剂改良后的砂土具有良好的保水特性,保水性能随稳定剂含量的增加保持增加趋势。随着水分的挥发,稳定剂在砂土颗粒之间形成网状膜,能够填充砂土内部孔隙,使得松散的砂土颗粒连接成为一体,有效提高砂土的抗渗性能,且在砂土表层能够形成固化层,有效减小土体内部水分流失,达到良好的保水效果。

关键词:水溶性稳定剂;砂土;渗透系数;保水特性;改良机理

中图分类号:TV443 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2021)04-0001-07

Study on water physical properties of sandy soil improved by water – soluble stabilizer

SHAO Yong^{1,2*}, LIU Jin³, HANG Dan², SUN Shaorui³, WANG Ying³, WEI Jihong³

(1. Water Conservancy Project Construction Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;
2. Jiangsu Province Taihu Governance Project Construction Administration, Changzhou 213000, China;
3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In view of the property of loose structure and easy erosion of sandy soils, water – soluble stabilizer was used to improve it. The permeability and water retention properties of sandy soils modified by different stabilizer contents were studied through constant head, variable head permeability test and water retention test, and the improvement mechanism was analyzed by SEM. The results showed that the content of stabilizer and the sample density could have important influence on the water properties of modified sandy soil. In the constant head permeability test, the initial effluent time of modified sandy soil gradually decreased with the increase of stabilizer content and density. When the stabilizer content reached 3%, the modified sandy soil would no longer flow out. The permeability coefficient of the modified sandy soil decreased significantly with the increase of sample density, and almost maintained an exponential decrease relation with the stabilizer content. When the stabilizer content reached 3%, the permeability coefficient approached 0. Sandy soil modified by stabilizer had good water retention property, which increasing with the increase of stabilizer content. As water evaporated, the stabilizer formed a network film

收稿日期:2020-10-19

基金项目:江苏省水利科技项目(2017010)

作者简介:邵勇(1979 —),男,高级工程师,博士,研究方向为水工结构。Email:46875561@qq.com

between the sand particles, which could fill the internal pores of the sand and connect the loose sand particles into one, effectively improving the impermeability of the sand, and forming a solidified layer on the surface of the sand, effectively reducing the internal water loss of the soil and achieving a good water retention effect.

Key words: water-soluble stabilizer; sandy soil; permeability coefficient; water retention properties; improvement mechanism

砂土具有结构松散,黏聚力低,强度低,抗渗性、保水性及抗冲刷性等水理性能较低等特点,常发生砂土液化、水土流失等问题,严重影响工程建设及生态环境保护,因此,需要对天然砂土采取一系列改良措施。常见的改良材料有水泥、石灰等传统硬性加固材料,以上加固材料能够显著改良砂土的工程性质。然而,在长期的工程实践中发现,这些传统硬性材料加固后的砂土常发生脆性破坏,且会对周围环境产生一定的影响,如提高环境 pH 值、影响植被生长等问题^[1-2]。因此,寻找既能满足工程建设要求又能满足生态环保的土体改良材料成为了岩土工程领域的一项研究热点。

聚合物作为一种新型土体改良材料,因其具有增加土体颗粒间联系、改良土体性质的效果,又具备成本低廉、生态环保、施工简单、效果稳定等优点,而被国内外学者广泛关注、研究并取得了大量研究成果^[3-5]。Alkhasha 等^[6]采用生物炭和合成聚合物对砂土进行加固改良,并对改良砂性土的水理特性及其加固机理进行了研究;王银梅等^[7]通过室内模型试验,研究了新型高分子材料 SH 固化剂固化后黄土的抗冲刷性能,研究表明改良后黄土的抗冲刷性能明显增强,且 SH 固化植草坡面对防治黄土边坡坡面冲刷更为有效;李昊等^[8]自主研发了多糖类高分子抗蚀材料 SA-01,并研究了该材料对红壤团聚体水稳性的影响,发现该改良材料能够有效提高团聚体的水稳性。以上研究表明,新型聚合物能够有效提高改良土体的抗风蚀、抗冲刷以及水稳性。随着研究的进一步深入,一些学者将聚合物与土体混合形成混合物,通过室内试验研究评价其强度特性,结果表明,聚合物能够有效增强土体的抗压强度、抗剪强度以及抗拉强度,聚合物溶液在土颗粒之间能够形成网状膜,使得松散的土体连接成为稳定的团聚体,减小土体内部孔隙,从而提高土体的强度^[9-12]。

现有的研究表明,聚合物在土体改良中发挥了重要作用。以上研究主要针对的是聚合物改良土的强度以及抗冲刷特性研究,而对其水理特性的研究还较少。土体的水理特性如渗透特性和保水对

土体的稳定性及植被生长产生重要影响。本文采用水溶性稳定剂对河道砂土进行改良,并通过渗透试验和保水性试验,研究不同含量稳定剂改良后砂土的渗透特性和保水特性,并对其改良机理进行了较深入的研究,研究成果可为河道砂土岸坡的加固提供一定的参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验砂土取自常州市武进区新孟河砂土岸坡,试验开始前,采用比重瓶法测得试样砂土比重为 2.64,同时通过筛分法和密度计法测得的砂土粒径分布曲线如图 1 所示,从图 1 中可以看出,砂土的约束粒径(D_{60})、平均粒径(D_{50})以及有效粒径(D_{10})分别为 0.12、0.065 和 0.005 mm。砂土详细的物理力学参数如表 1 所示。

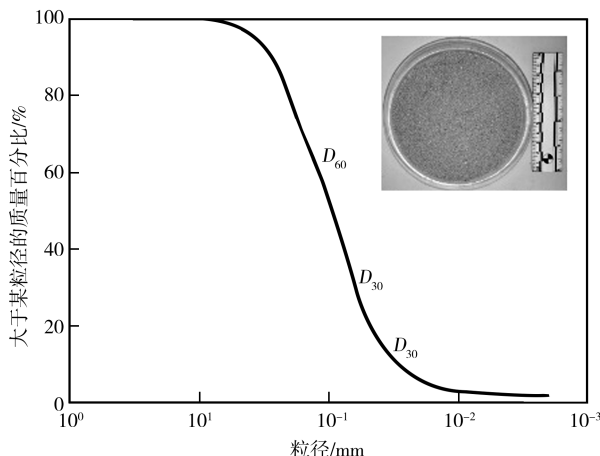


图 1 砂土粒径分布曲线

表 1 砂土的物理力学参数

比重 G_s	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
2.64	ρ_{\max} 1.68	ρ_{\min} 1.37	24	0.142

试验中用于改良砂土的水溶性聚合物为聚氨酯型有机聚合物,是一种含大量重复结构、大分子两端带有特殊功能团的高分子聚合物,分子结构如

图2所示,与水混合后能够迅速发生反应形成乳白色溶液。其水溶液可在常温条件下直接与砂土颗粒胶结或与黏度矿物反应生成网状胶凝物质,从而起到增强土体间颗粒联系、改善土体结构与性能、提升土体整体稳定性的作用。水溶性聚合物详细的物理参数如表2所示。

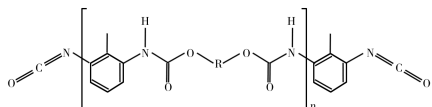


图2 水溶性稳定剂及化学式

表2 水溶性稳定剂的物理参数

外观	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏度/ ($\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$)	抱水性	固化含量/ %	凝固时间/ s
浅黄色透明液体	1.18	650 ~ 700	≥ 40	85	30 ~ 1800

1.2 试验方案

为深入研究改良砂土的水理特性,本文开展渗透试验和保水试验,研究稳定剂含量(与砂土的质量百分比)和干密度对改良砂土抗渗性能、保水性能的影响。结合现场施工难易程度和成本,选取稳定剂含量为0%、1%、2%、3%和4%,密度控制为 1.40 g/cm^3 、 1.45 g/cm^3 、 1.50 g/cm^3 、 1.55 g/cm^3 和 1.60 g/cm^3 ,试样初始含水率为15%。试样制备完成后,先养护6 h再进行以下试验。

1.2.1 常水头渗透试验

常水头渗透试验采用的仪器为TST-70型常水头渗透仪,试样制备依据《土工试验方法标准》(GBT50123—2019)进行分层压实。在试验过程中记录试验的初始出水时间。试验完成后,依据公式(1),计算不同稳定剂浓度和不同干密度条件下改良砂土的渗透系数 K :

$$K = \frac{QL}{A\Delta h\Delta t} \quad (1)$$

式中: Q 为 Δt 时间内通过试样断面的渗流量, cm^3 ; A 为试样沿渗流方向的横截面积, cm^2 ,对于TST-70型渗透仪, $A = 78.5 \text{ cm}^2$; L 为渗径长度, cm ;对于TST-70型渗透仪, $L = 10 \text{ cm}$, Δh 为试验时相邻测压管间平均水位差, cm , $\Delta h = 0.5(H_1 - H_3)$,其中 H_1 、 H_3 分别为上下测压管的水位高度。

1.2.2 变水头渗透试验

当稳定剂含量达到3%和4%时,改良砂土的渗

透系数已相对较小,采用常水头试验时出水孔不再有水流出,无法准确测量改良砂土渗透系数,故利用变水头试验测定其渗透系数。变水头渗透试验采用的仪器是TST-55渗透仪。

变水头渗透试验试样制备方法为静力压实法,首先按试验所需配比称取适量的砂土、稳定剂及水备用;然后将水倒入稳定剂中配置好稳定剂溶液,并将其将倒入称取好的砂土中迅速搅拌至均匀,接着装入4 cm环刀中压实至试验设计干密度,静置数分钟待试样稳定,在环刀外侧涂上凡士林,与试样一同放入变水头试验仪器中,模具下部缝隙处打上玻璃胶进行密封。试验完成后根据达西定律求出相应的渗透系数,渗透系数计算公式

$$K = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \lg \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} \quad (2)$$

式中: a 为测压管的内截面积, cm^2 ,取 0.277 cm^2 ; L 为试样的高度, cm ,取4 cm; A 为试样的面积, cm^2 ,取 30 cm^2 ; Δh 为某时刻测压管内水位与出水口的水位差, cm ,其大小由测压管上的刻度尺读出,其中 Δh_1 与 Δh_2 分别指在 t_1 和 t_2 时刻测压管内水位与出水口的水位差, cm 。

1.2.3 保水试验

岸坡表面砂土的保水能力将会对植被的生长产生重要影响,因而需要对改良砂土试样保水性进行深入研究。保水试验的具体方案为:取700 g风干砂土与稳定剂和水分别按0%、1%、2%、3%和4%的比例混合,初始含水率为10%,密度为 1.50 g/cm^3 。试样制备完成后,称重记录初始含水率,放在室温环境下,每8 h进行1次称重计算试样含水率。试验过程中10 d为1个周期,在第10天傍晚、第20天傍晚分别给试样加水70 g,第11天早晨及第21天早晨将试样中多余未渗入试样中的水放出,之后再对试样称重记录试样含水率,重复8 h记录1次数据,直至30 d记录最后1次数据,并绘制出不同稳定剂含量改良砂土试样含水率随时间变化的曲线图,研究不同时间段试样含水率与稳定剂含量之间的关系。

2 试验结果与分析

为了研究改良砂土的水理特性,对不同稳定剂含量和不同干密度的砂土进行常水头和变水头以及保水试验,得到如表 3 所示试验结果。

表 3 改良砂土水理特性试验结果

固化剂含量 $P_c/\%$	试样干密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	出水时间 T/s	渗透系数 $K/$ $(10^{-4} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
0	1.40	9	7.610
1	1.40	161	5.871
2	1.40	448	2.552
3	1.40	∞	1.110
4	1.40	∞	0.299
0	1.45	11	7.030
1	1.45	169	4.991
2	1.45	455	2.179
3	1.45	∞	0.984
4	1.45	∞	0.281
0	1.50	13	6.570
1	1.50	175	4.355
2	1.50	461	1.859
3	1.50	∞	0.781
4	1.50	∞	0.183
0	1.55	16	5.660
1	1.55	179	3.849
2	1.55	473	1.075
3	1.55	∞	0.453
4	1.55	∞	0.113
0	1.60	19	4.780
1	1.60	184	3.070
2	1.60	483	0.761
3	1.60	∞	0.108
4	1.60	∞	0.029

2.1 初始出水时间

图 3 为不同密度试样初始出水时间与稳定剂含量之间的关系。从图 3 中可以看出,在相同密度下,稳定剂含量对改良砂土的初次出水时间起到显著的延迟影响作用,稳定剂含量越高,试样初样初次出水时间越长,在稳定剂含量从 1% 增加到 3% 的过程中,初始出水时间与稳定剂含量几乎保持指数增加关系。在相同稳定剂含量条件下,试样干密度的增加也会延长试样在常水头试验中初次出水时间,但影响较小。结合表 3 可知,相较于试样的干密度,稳定剂含量对试样初次出水时间影响要大的多。试验开始注水后初始渗水时间可以用孔隙水压力达到稳定的时间来估算,故而初始渗水时间与试样的水力扩散率和水传输所经过的路程有关,在相同的试样形状与试样尺寸的条件下,试样初始出水时间与试验过程中试样的水力扩散率有关,而试样的水力扩散率与试样的渗透系数之间存在一定的换算关系,即试样初始渗水时间与渗透系数相关。改良砂土由于颗粒间的孔隙被稳定剂与水反应生成的网状黏膜所填充,使得砂土渗透性能变差,水力扩散率大大减小,孔隙压力达到稳定的时间被延长,呈现出试样初次出水时间被大大延长的现象。结合表 3 可知,当稳定剂含量达到 3% 及其以上时,砂土抗渗性能得到显著的提升,在常水头渗透试验中,砂土中孔隙压力达到稳定的时间被无限延长,甚至随着稳定剂含量的进一步增加,砂土会变成隔水材料,孔隙压力无法达到稳定,试样也不再出水。故稳定剂可以提高砂土的抗渗性能,当稳定剂含量达到 3% 及以上时,砂土抗渗性能与粉质黏土等隔水材料的抗渗性能几乎一致,试样在常水头渗透试验过程中不再出水。

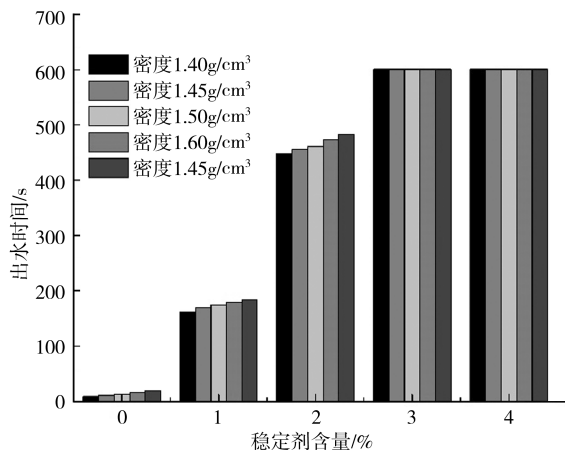


图 3 不同含量固化剂固化砂土初始出水时间

2.2 渗透系数

不同密度改良砂土的渗透系数与稳定剂含量之间的关系如图4所示。从图4可以观察到,水溶性稳定剂对砂土的抗渗性能起到显著增加作用,渗透系数随着稳定剂含量的增加而显著减小,且在一定范围内,渗透系数的减小速率亦随着稳定剂含量的增加而加快。结合表3可知,试样密度为 1.50 g/cm^3 时,当稳定剂含量以1%的增长幅度从0%增长至4%过程中,砂土渗透系数分别为 $6.570 \times 10^{-4}\text{ cm/s}$ 、 $4.355 \times 10^{-4}\text{ cm/s}$ 、 $1.859 \times 10^{-4}\text{ cm/s}$ 、 $0.781 \times 10^{-4}\text{ cm/s}$ 和 $0.183 \times 10^{-4}\text{ cm/s}$,可以明显看到砂土渗透系数快速减小,抗渗性能逐渐提升。随着稳定剂含量的增加,改良砂土的渗透系数分别为前一稳定剂含量改良砂土的66%、43%、42%和23%,且渗透系数递减速率随稳定剂含量的增加而增加。从图4还可以看出,随着密度的增加,砂土颗粒之间的连接更为紧密,孔隙减小,从而改良砂土的渗透系数随密度表现出逐渐减小的趋势。且当密度为 1.40 g/cm^3 、 1.45 g/cm^3 、 1.55 g/cm^3 和 1.60 g/cm^3 时,试样的渗透系数随稳定剂含量变化的规律基本保持一致。从改良砂土的渗透系数与稳定剂含量之间的变化关系还可以看出,当稳定剂达到3%及以上时,试样的渗透系数比未改良的试样降低了一个数量级,砂土的抗渗性能亦得到了明显的提升。

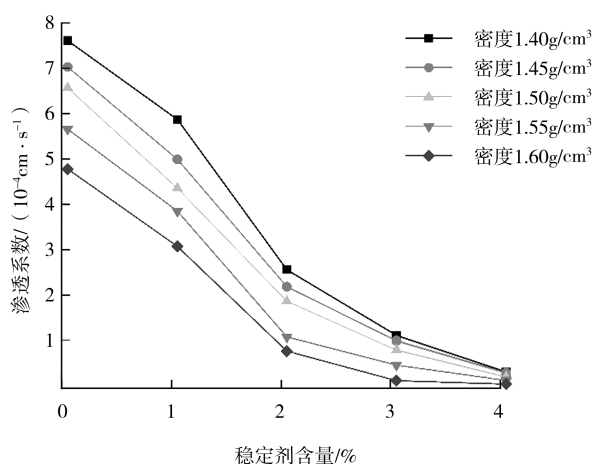


图4 不同密度固化砂土渗透系数与稳定剂含量之间的关系

稳定剂与水反应后形成的溶液会在砂土颗粒之间生成稳定的网状膜,该网状膜不仅能够增加砂土颗粒之间的黏结强度,同时也会充填砂土颗粒之间的间隙,堵塞砂土中的水流渗漏通道,阻碍水流的快速下渗,从而降低改良砂土的渗透系数。且稳定剂含量越高,砂土颗粒间形成的网状黏膜密度越

大,砂土颗粒空隙的被填充率越高,水流的渗透通道就越少。从渗透试验结果可知,当稳定剂含量达到2%时,稳定剂溶液反应产生的网状黏膜已经将砂土的绝大部分的空隙都填充了,堵塞了大多数水流的渗漏通道,极大程度上阻碍水流的下渗。当稳定剂含量达到4%时,砂土颗粒之间的网状黏膜几乎将所有的砂土及砂土之间的空隙充填,改良砂土在试验过程中几乎不再出水,渗透系数趋近于零,与粉质黏土的抗渗效果几乎一致。

2.3 保水性能试验结果

图5为不同稳定剂含量改良砂土的含水率随时间的变化关系。从试验结果可以看出稳定剂可以增加砂土的保水性,减缓水在砂土中的流失速率,但当稳定剂含量达到3%及其以上时,由于砂土抗渗性能随稳定剂含量增加而提升,导致之后2次加水过程只有少量水分渗入土体中,试样的含水量得不到及时补充,将不利于植被生长。从图5中可以看出,在第一次加水过程中,未改良砂土试样的含水率下降速率远超过稳定剂改良后的试样,加入稳定剂含量为1%、2%和3%的试样含水率下降速率几乎保持一致,而加入4%含量的试样含水率下降速率更加缓慢。养护时间到达7 d时,未改良试样的含水率已经变为0,而加入稳定剂的试样含水率下降速率逐渐趋于稳定。养护时间达到10 d时,加入1%、2%、3%和4%的砂土含水率分别为0.96%、2.05%、2.45%、2.95%。第10 d傍晚同时对试样加水70 g,只有未改良试样和稳定剂含量为1%试样含水量得到大幅度的补充,稳定剂含量为3%和4%的试样几乎不再吸收水分,含水率只有极小程度的提高,12 h后释放多余的水,测得含水率分别为8.64%、7.33%、6.23%、5.01%和3.95%,含水率分别增加了8.64%、6.37%、4.18%、2.56%和1.00%。在第二次加水过程中,未改良试样含水率依旧快速下降,在第17天的时候下降为0,稳定剂改良后的试样均是以先大后小的速率下降,第20天时含水率分别为0.76%、1.79%、2.28%和2.74%。第20天傍晚进行第三次加水,试样含水率分别增长为9.14%、6.44%、5.31%、4.15%和3.45%,含水率增加量分别为9.14%、5.86%、3.25%、1.78%和0.71%。第三次加水过程中,试样含水率下降规律与前2个周期大致相同,30 d后含水率分别为0%、0.13%、1.68%、2.17%、2.56%。从上述分析可以得出聚合物可以减缓砂土含水率下降速率,但高浓度聚合物改良砂土在含

水量补充方面十分困难。

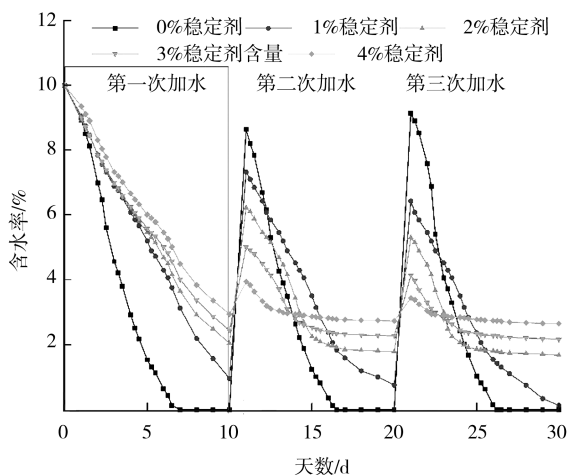


图5 不同含量稳定剂固化砂土含水率随时间的变化关系

3 机理分析

聚氨酯型水溶性稳定剂因黏度大、稠度高,通常在应用于实际工程加固土体时需要加水进行稀释,在稀释过程中高分子预聚体与水反应生成聚脲高分子^[13-14],同时在表面活性剂的作用下可以使聚脲高分子均匀分布在水溶液中并形成较为稳定的结构体系,混合后的稀释溶液呈乳白色流状胶体。水溶性稳定剂与砂土混合后,迅速渗入砂土颗粒中,且水溶性稳定剂属于气硬性材料,在养护过程中随着稳定剂溶液水分的挥发,稳定剂溶液在砂土颗粒之间形成了大量的网状膜,使得松散的土颗粒被网状膜相互连接成为一体。图6为改良砂土的扫描电镜图,从图中可以清楚地看到,砂土颗粒被稳定剂网状膜包裹连接,且砂土颗粒之间的孔隙也被固化膜大量填充,从而水溶性稳定剂能够显著改良砂土的水理特性。

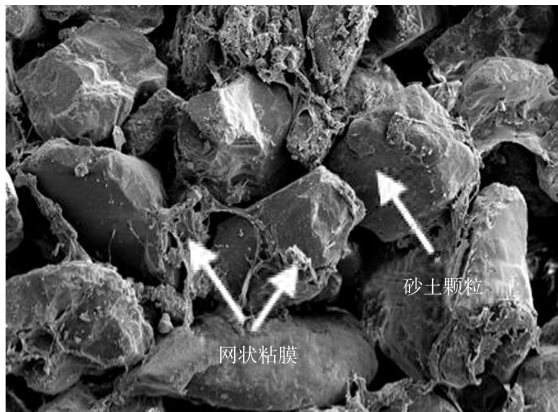


图6 改良砂土的扫描电镜图

关于稳定剂的加固机理可以分为两个方面:一是稳定剂溶液作用于砂土颗粒间孔隙中。当稳定

剂溶液与砂土混合时,一部分溶液迅速填充砂土孔隙并将其作为反应场所,在孔隙中反应形成具有较强黏附力的网状固化膜,在砂土相邻颗粒之间增加了一条纽带,增强颗粒与颗粒间的联系并将松散颗粒与孔隙粘结为一体,使松散的砂土颗粒黏聚成完整且牢固的结构整体^[15-16]。二是稳定剂溶液作用于砂土颗粒。当稳定剂溶液与砂土混合时,另一部分溶液形成网状膜将砂土颗粒包裹、缠绕。由于稳定剂端基的官能团可以与砂土颗粒带有的基团发生反应,在网状黏膜与砂土颗粒之间建立起一种物理—化学的连接作用,使得网状黏膜能够缠绕、黏附在砂土颗粒的表面,改善砂土颗粒的性质^[17-18]。图7为稳定剂改良砂土的加固机理示意图。从图7可以看出,分散在砂土颗粒之间的网状膜能够显著充填砂土孔隙,且连续的网状膜有效阻断砂土颗粒间的渗流通道,且随着稳定剂含量的增加,砂土颗粒间孔隙的充填率越高,从而随着稳定剂含量的增加,砂土的渗透系数逐渐减小。稳定剂溶液加入到砂土中时,随着渗流作用,首先会在砂土表层形成一定厚度的固化层。该固化层能够阻碍试样内部与空气中的水分交换,从而与天然砂土相比,随着养护时间的增加,稳定剂改良后砂土的含水率减小缓慢,且加入较多含量稳定剂的砂土含水率越高。这表明稳定剂能够有效提高砂土的保水特性。

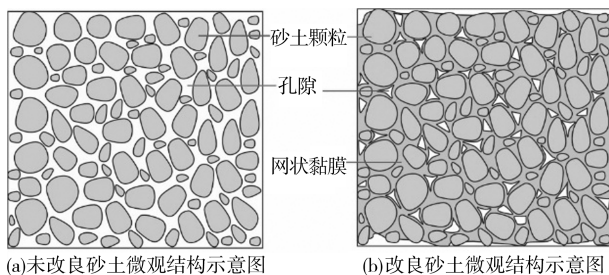


图7 固化砂土改良机理示意图

4 结 论

(1)改良砂土的初始出水时间随着稳定剂含量和密度的增加保持增加趋势,且当稳定剂含量达到3%后,试样不再有水流出。

(2)改良砂土的渗透系数随密度的增加而显著减小,且随稳定剂含量的增加保持指数减小的关系,当稳定剂含量达到3%后,改良砂土几乎不透水。

(3)在相同养护时间下,随着稳定剂含量的增加,改良砂土的含水率逐渐增加,表明稳定剂能够有效增强砂土的保水特性

(4)稳定剂在砂土内部形成连续的网状膜,使得松散的砂土颗粒连接成为一体,且固化膜能够充填孔隙,有效降低砂土的渗透特性,减少水分挥发,达到良好的保水效果。

参考文献:

- [1] Imbabi M S, Carrigan C, McKenna S. Trends and developments in green cement and concrete technology[J]. International Journal of Sustainable Built Environment. 2012, 1(2):194-216.
- [2] 刘瑾,白玉霞,宋泽卓,等. OPS型固化剂改良砂土工程特性试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(3):495-501.
- [3] 吴淑芳,吴普特,冯浩. 高分子聚合物对土壤物理性质的影响研究[J]. 水土保持通报, 2003, 23(1):42-45.
- [4] 郭付军,赵振威,张杰,等. 使用聚合物对纯砂层进行渣土改良的试验研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(Sup1):53-58.
- [5] BUMANIS G, VITOLA L, PUNDIENE I, et al. Gypsum, geopolymers, and starch – alternative binders for bio – based building materials: a review and life – cycle assessment[J]. Sustainability. 2020, 12(14):5666.
- [6] ALKHASHA A, AL – OMRAN A, ALY A. Effects of biochar and synthetic polymer on the hydro – physical properties of sandy soils[J]. Sustainability, 2018, 10(12):4642.
- [7] 王银梅,徐鹏飞. 新型高分子材料固化黄土边坡的抗冲刷试验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(6):98-102.
- [8] 李昊,胡甲均,任红玉. SA – 01型高分子土壤抗蚀剂改良土壤团聚体水稳性的试验研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4):168-173.
- [9] 汪勇,刘瑾,宋泽卓,等. 高分子稳定剂加固河道边坡表层砂土室内试验研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2018, 54(6):45-54.
- [10] 邵勇,刘瑾,王颖,等. 基于PPS型固化剂的砂土岸坡表层土抗冲刷性能研究[J]. 江苏水利, 2019, 000(11):32-37.
- [11] REZAEIMALEK S, HUANG J, BIN – SHAFIQUE S. Performance evaluation for polymer – stabilized soils [J]. Transportation Research Record, 2017, 2657(1):58-66.
- [12] GHASEMZADEH H, MEHRPAJOUH A, PISHVAEI M, et al. Effects of curing method and glass transition temperature on the unconfined compressive strength of acrylic liquid polymer – stabilized kaolinite[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(8):20-21.
- [13] JIN L, YUXIA B, ZEZHUO S, et al. Evaluation of strength properties of sand modified with organic polymers[J]. Polymers, 2018, 10(3):287.
- [14] 李崇清,刘清秉,项伟,等. SH固化剂复配无机材料加固黄土抗侵蚀试验研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(8):94-98, 105.
- [15] 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.
- [16] ONYEJEKWE S, GHATAORA GS. Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer[J]. Bulletin of Engineering Geology, 2015, 74(2):651-665.
- [17] Zhu Y, Yu X, Gao L, et al. Unconfined Compressive Strength of Aqueous Polymer – Modified Saline Soil[J]. International Journal of Polymer Science, 2019(7):1-11.
- [18] 王银梅,高立成. 固化黄土渗透特性的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2013, 44(1):63-66.