

文章编号:1007-9629(2022)06-0598-09

高聚物固化粉土的力学特性与固结机理

王超杰¹, 李逢源^{1,2}, 郭成超^{2,*}, 郝继锋³, 周学友³

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中山大学 土木工程学院, 广东 广州 510275; 3. 南水北调中线干线工程建设管理局渠首分局, 河南 南阳 473000)

摘要:使用胶结型高聚物对粉土进行固化,研究了高聚物掺量、粉土含水率、养护龄期对固化粉土力学特性的影响及其固化机理。结果表明:高聚物对粉土具有良好的固化效果,高聚物掺量越高,粉土含水率越低,养护龄期越长,固化土的强度越高;高聚物能够有效附着在粉土表面,并填充于粉土颗粒之间,主要通过“包裹”、“填充”、“桥接”作用,减小粉土的孔隙比,提高粉土的密实度,从而提升粉土的强度和抗渗性,但在此过程中没有生成新的化合物。

关键词:高聚物;粉土;力学特性;微观机理

中图分类号:TU526

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.06.008

Mechanical Properties and Consolidation Mechanism of Polymer Solidified Silt Soil

WANG Chaojie¹, LI Fengyuan^{1,2}, GUO Chengchao^{2,*}, HAO Jifeng³, ZHOU Xueyou³

(1. School of Water Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Headwork Branch of Central Route Construction Management Bureau of South to North Water Transfer Project, Nanyang 473000, China)

Abstract: The cemented polymer was used to solidify silt soil. The effects of polymer content, silt soil moisture, and curing time on the mechanical property of the silt soil have been investigated. The solidification mechanism of polymer for silt soil was demonstrated. The results indicate that polymer has a good consolidation effect on silt soil. The strength of solidified silt soil increases with the increase of polymer content, the decrease of silt soil moisture content and the increase of curing time. Polymer can effectively adhere to the surface of silt soil and fill voids between silt soil particles. Polymer can reduce the porosity ratio and improve the compactness of silt soil, so as to improve the strength and anti-permeability of silt soil mainly through adhesion, wrapping, filling, and bridging. No new compounds are produced in this process.

Key words: polymer; silt soil; mechanical property; microcosmic mechanism

粉土具有孔隙率高、容易吸水引发翻浆、动荷载作用下易液化^[1]等不良工程性质,给工程建设带来一系列困难,所以需要对其进行固化改良,以满足工程建设的需要。目前,使用较为广泛的土壤固化剂可分为无机和有机类固化剂。无机类固化剂主要指水泥、石灰等,已有大量试验系统地研究了该类固化剂的改性效果和固化机理^[2-11]。有机固化剂主要有改性水

玻璃^[12]、天然树脂等^[13],大多数有机固化剂为液态,具有强大的溶解、置换能力,但对土壤含水率有着严格的要求。其主要通过固化剂中的活性物质来降低水的表面张力,置换出土壤中的阳离子,减小土壤间的斥力,在土颗粒表面及孔隙中形成网状膜结构,从而提高土壤的强度^[14]。材料方面,兰州大学对研制的高分子改性聚乙烯醇(SH)开展了较多研究^[15-17],固化

收稿日期:2021-04-14; 修订日期:2021-06-15

基金项目:“十三五”国家重点研发计划资助项目(2017YFC1502606);广东省引进创新创业团队项目(2016ZT06N340)

第一作者:王超杰(1993—),男,河南周口人,郑州大学博士生.E-mail: wangyichaojie123@163.com

通讯作者:郭成超(1973—),男,河南南阳人,中山大学教授,博士生导师,博士.E-mail: guochch25@mail.sysu.edu.cn

效果较好.吴淑芳等^[18]、Callebaut等^[19]研究了聚丙烯酸类高聚物对土体的固化效果.由于具有胶结能力强、结石体强度高、耐久性好的特点,聚氨酯类高聚物固化剂也被应用于土壤固化领域,但目前主要集中在对砂土的固化^[20],对粉土的固化研究还较少,且固化机理也不够明确.因此,开展高聚物固化粉土的研究有着重要意义.

本文研发了一种可固化粉土的胶结型高聚物,通过室内试验从宏观方面探究含水率、高聚物掺量及养护龄期对固化粉土力学特性的影响,并借助扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)以及压汞试验(MIP),从微观方面揭示粉土的固化规律和改良机理,旨在为粉土的加固提供新的思路,并为高聚物类固化剂的研究提供一定的科学依据.

1 试验材料及方法

1.1 粉土

试验用土取自郑州某建筑工地,取土深度为3 m,土的物理性能如表1所示.土的颗粒分布曲线如图1所示.由图1可见,粒径大于0.075 mm的颗粒质量约为总质量的34.48%,不超过总质量的50%.参照JTG 3430—2020《公路土工试验规程》,该土为粉土.将土锤碎、晾晒、过2 mm筛,封存备用.

表1 粉土的物理性能
Table 1 Physical properties of the silt soil

Property	Result
Relative density	2.70
Maximum dry density/(g·cm ⁻³)	1.72
Optimum moisture content(by mass)/%	12.70
Liquid limit(by mass)/%	24.50
Plastic limit(by mass)/%	17.30
Plasticity index	7.20

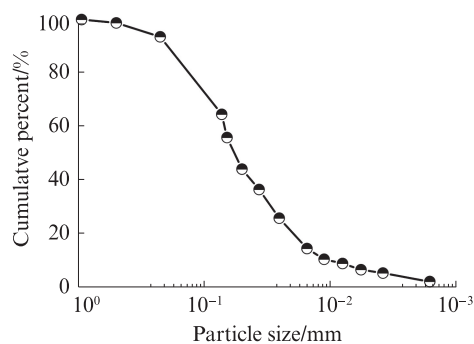


图1 粉土的颗粒分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution of silt soil

1.2 胶结型高聚物材料

试验用高聚物为本课题组研发的一种胶结型聚

氨酯类材料,由A、B双组分构成:A组分基本组成为多元醇、表面活性剂和阻燃剂等,密度为1.26 g/cm³;B组分主要组成为增塑剂和聚合异氰酸酯,密度为1.17 g/cm³.双组分按照质量比1:1混合反应,生成聚氨基甲酸酯高分子化合物(简称高聚物),其反应固化时间可以通过添加催化剂加以调节.本次试验所用高聚物在20℃条件下的反应凝固时间约为6 h,A、B组分一经混合即开始发生化学反应.图2为高聚物抗压强度随龄期的变化.由图2可见,高聚物的1 d抗压强度超过1.2 MPa,3 d基本达到最大强度.

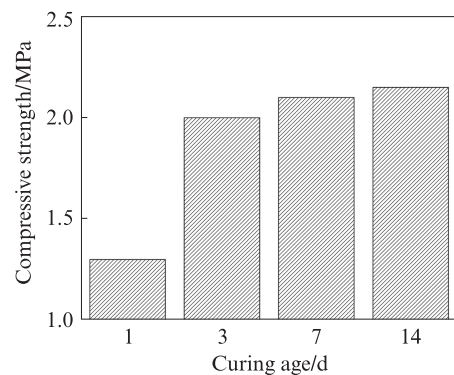


图2 高聚物抗压强度随龄期的变化

Fig. 2 Compressive strength of polymer varies with age

1.3 试验设计

1.3.1 无侧限抗压强度(UCS)试验

使用无侧限抗压强度来表征固化土的强度特性,主要研究高聚物掺量(质量分数,文中涉及的掺量、水固比等除特别说明外均为质量分数或质量比)、粉土含水率和养护龄期对固化土力学特性的影响.无侧限抗压强度试验方案设计如表2所示.为使试验结果更具代表性,每个参数制作6个试样,结果取其平均值,共计480个试样.

1.3.2 渗透系数(k)试验

抗渗性是固化土的关键性能之一,根据已有的试验结果,设置高聚物固化土的渗透系数影响因素取值水平.渗透系数试验方案设计如表3所示.为使试验结果更具代表性,每个参数制作3个试样,结果取其平均值,总计60个试样.

1.4 试验方法

首先将高聚物A、B组分混合搅拌,然后采用拌和的方式将其掺入土体中,根据GBT 50123—1999《土工试验方法标准》制作试样;然后,将试样置于恒温恒湿试验箱中养护至规定龄期,再使用三轴仪测试其无侧限抗压强度,使用变水头渗透试验测定固化土渗透系数;最后,取强度测试后的破碎小样,进行SEM、XRD、MIP试验.

表 2 无侧限抗压强度试验方案设计
Table 2 Design of UCS test scheme

Group No.	w(water)/%	w(polymer)/%	Curing age/d	Number of samples
Control group	8	0	28	6
1	8	5	1/7/14/21/28	30
2		10	1/7/14/21/28	30
3		13	1/7/14/21/28	30
4		15	1/7/14/21/28	30
5	10	5	1/7/14/21/28	30
6		10	1/7/14/21/28	30
7		13	1/7/14/21/28	30
8		15	1/7/14/21/28	30
9	13	5	1/7/14/21/28	30
10		10	1/7/14/21/28	30
11		13	1/7/14/21/28	30
12		15	1/7/14/21/28	30
13	15	5	1/7/14/21/28	30
14		10	1/7/14/21/28	30
15		13	1/7/14/21/28	30
16		15	1/7/14/21/28	30

表 3 渗透系数试验方案设计
Table 3 Design of permeability coefficient test scheme

Group No.	w(water)/%	w(polymer)/%	Curing age/d	Number of samples
1	8	5	1/7/14/21/28	15
2		10	1/7/14/21/28	15
3		13	1/7/14/21/28	15
4		15	1/7/14/21/28	15

2 结果与讨论

2.1 高聚物掺量对固化土无侧限抗压强度的影响

图 3 为不同含水率下高聚物掺量与固化土无侧限抗压强度的关系。由图 3 可见：含水率为 8% 时，在相同龄期下，高聚物掺量对固化土无侧限抗压强度的影响显著；以含水率 8%、标准养护 28 d 试样为例，高聚物掺量为 5% 时，固化土的无侧限抗压强度为 0.75 MPa，高聚物掺量为 10% 时，固化土的无侧限抗压强度为 2.89 MPa，高聚物掺量提高了 1 倍，但固化土的无侧限抗压强度提高了 2.8 倍以上；高聚物掺量为 13%、15% 时，与高聚物掺量为 5% 的试样相比，固化土的无侧限抗压强度增加了 4.3 倍和 7.3 倍以上；高聚物掺量越高，固化土的强度越高，符合一般外掺固化剂土壤强度的增长规律；纯素土的 28 d 无侧限抗压强度为 0.22 MPa，固化土的 28 d 无侧限抗压强度与纯素土相比，提高了 2.5~27.7 倍，这充分证明了本文所用的渗透型高聚物对粉土具有较好的固化效果。

从图 3 中可以明显看出，固化土无侧限抗压强度

的变化与高聚物材料的关系是非线性的，固化土的无侧限抗压强度随着高聚物掺量的增加，走势逐渐陡峭。产生这种现象的原因是：在掺量较少时，高聚物在粉土中分布不均匀，只能填充部分土颗粒间的大孔隙；随着掺量的增多，高聚物除了能够填充土颗粒间的大孔隙，还能对相邻的土颗粒进行粘黏，形成“高聚物-土颗粒”团聚体，同时会逐渐形成高聚物骨架以及高聚物薄膜，因此固化土的无侧限抗压强度有了极大的提升。其他含水率试样无侧限抗压强度的变化规律与含水率为 8% 的试样相同。

2.2 龄期对固化土无侧限抗压强度的影响

图 4 为固化土无侧限抗压强度与养护龄期的关系。由图 4 可见，当高聚物掺量和含水率相同时，试样养护龄期越长，其无侧限抗压强度越大，呈明显的线性关系。高聚物在土中反应跟在空气中不同，其在空气中反应时，集聚程度高，反应产生热量会加固反应进程。高聚物掺入粉土后，其在土中比较分散，聚集程度低，反应产生的热量散失快，所以反应缓慢，导致了固化土的强度在 28 d 内逐渐增长。这与水泥固

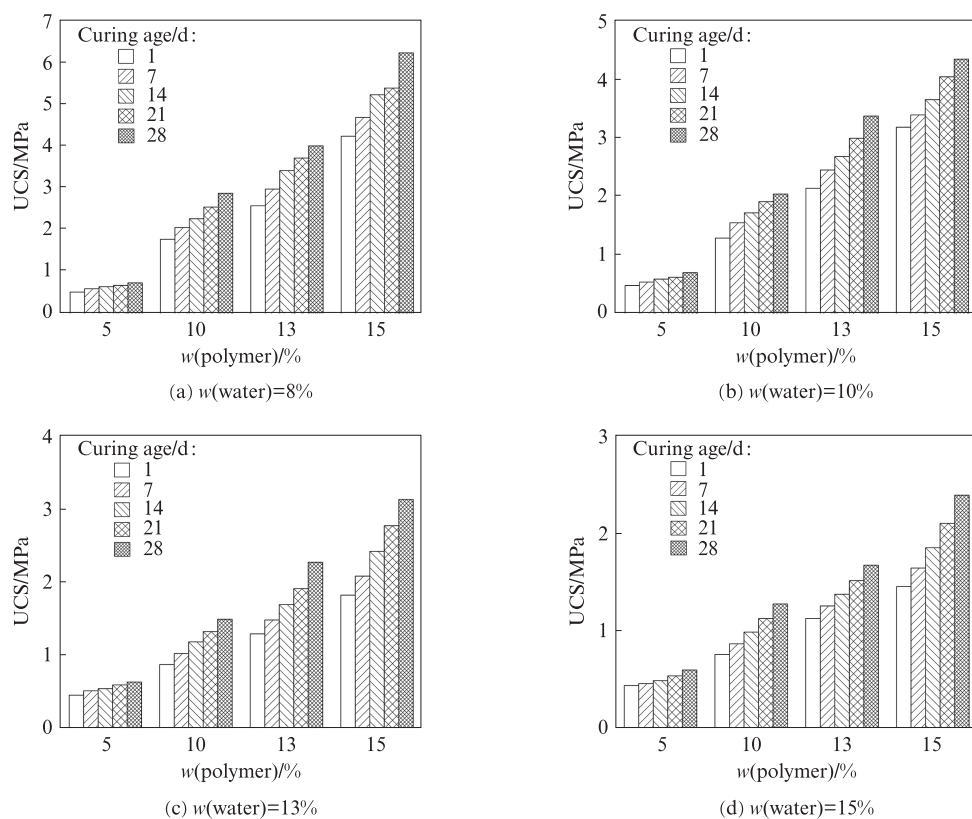


图3 不同含水率下高聚物掺量与固化土无侧限抗压强度的关系

Fig. 3 Relationship between polymer content and UCS of solidified silt soil at different water contents

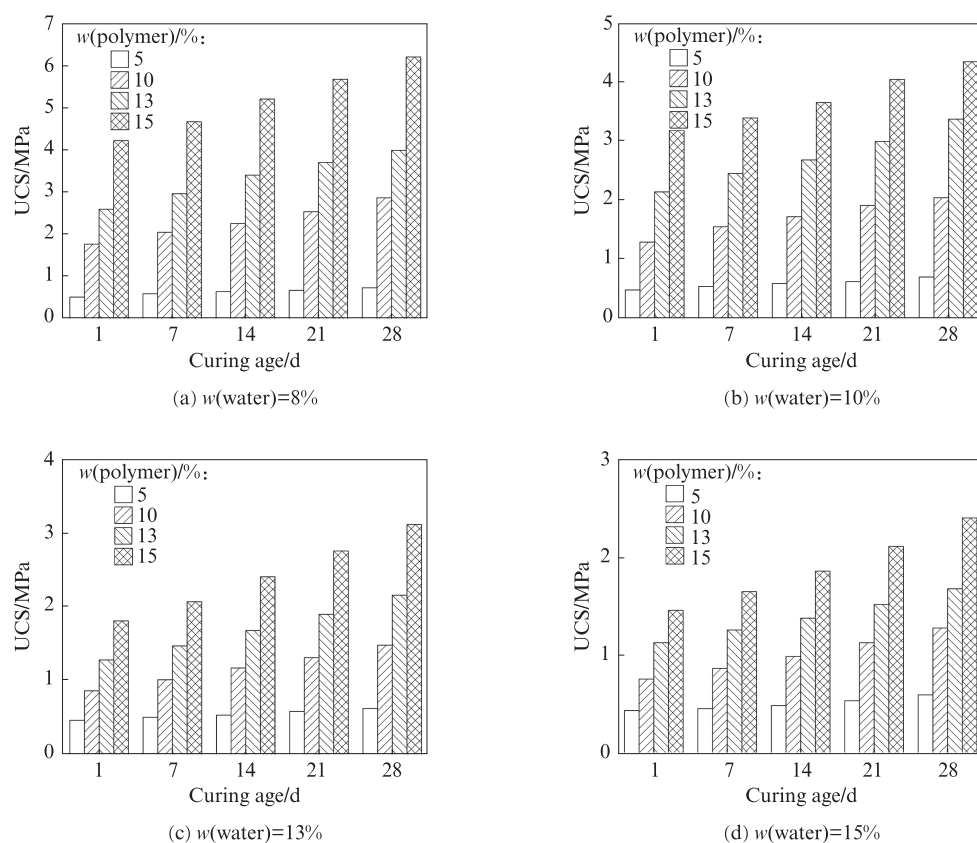


图4 固化土无侧限抗压强度与养护龄期的关系

Fig. 4 Relationship between UCS and curing time of solidified silt soil

化土强度的发展规律相似^[21-22],但是高掺量高聚物固化土的初始强度及28 d强度均高于水泥固化土,具有更优异的力学性能。

2.3 粉土含水率对固化土强度的影响

图5为粉土含水率与固化土无侧限抗压强度的关系。由图5可见:相同龄期、同一高聚物掺量条件下,随着粉土含水率增加,固化土试样的无侧限抗压强度随之下降;以高聚物掺量为15%,养护龄期28 d试样为例,当含水率从8%增加至10%时,无侧限抗压强度下降了约30.0%,含水率由13%增加至15%时,无侧限抗压强度下降了约23.0%,平均下降幅度约为27.0%;对于高聚物掺量为5%的试样,其无侧限抗压强度随含水率增高而下降的幅度较小,平均降幅约为7.1%。

从图5同样可以看出:高聚物掺量为5%的试样,其无侧限抗压强度随粉土含水率的变化较小,表现出部分线性关系;其他掺量下的试样为非线性变化,即随着含水率的升高,无侧限抗压强度的下降趋势有所缓和。这是因为,在含水率较小时,粉土中水的存在,将会影响高聚物与土颗粒的黏结。当含水率在较低范围内变化时,这种影响比较明显,含水率为

无侧限抗压强度的主要影响因素;当含水率处于较高水平时,由于大量水分的存在,土颗粒表面被水膜包裹,影响高聚物与土颗粒的粘结能力,含水率在较高范围内变化时,这种粘结能力对强度的影响会明显减弱,主要是高聚物对粉土大孔隙的填充作用影响其无侧限抗压强度。

2.4 高聚物掺量对固化土渗透性的影响

图6为含水率为8%时高聚物掺量与固化土渗透系数的关系。由图6可见:

(1)在相同龄期下,随着高聚物掺量的增加,固化土的渗透系数逐渐减小。这是因为在相同条件下,高聚物掺量增大,反应后产物会增多,这会导致土的密实度增加,从而使固化土的渗透系数逐渐减小。

(2)随着高聚物掺量的增加,渗透系数下降曲线的趋势并不相同,在高聚物掺量处于较低水平时,渗透系数下降较为“陡峭”,在高聚物掺量处于较高水平时,渗透系数下降较为“平缓”。这是因为高聚物掺量较少时,土颗粒间的大孔隙是主要的渗流通道,掺入粉土中的高聚物基本填充于土颗粒间的较大孔隙。随着高聚物掺量的增多,大孔隙基本被填充后,土颗

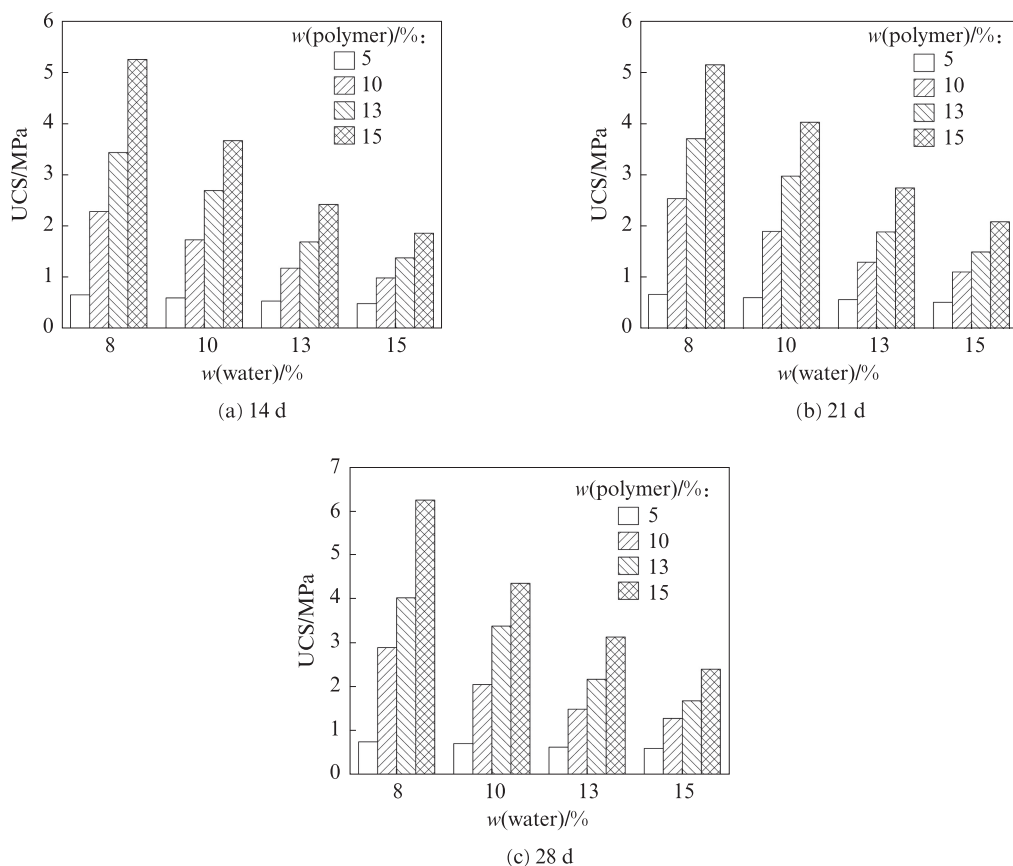


图5 固化土无侧限抗压强度与粉土含水率的关系

Fig. 5 Relationship between UCS of solidified silt soil and moisture content of silt soil

粒间的微孔隙将被继续填充,而小孔隙对渗透系数的影响较小,因而在高聚物掺量较高时,渗透系数随高聚物掺量的变化就较小.这一结论与水泥土试验规律相近,且高聚物固化土与水泥土的渗透系数基本处于同一数量级^[23].

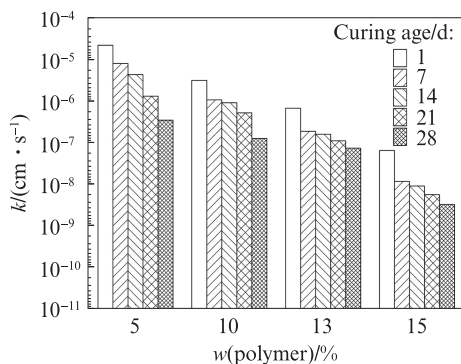


图6 含水率为8%时固化土渗透系数与高聚物掺量的关系
Fig. 6 Relation ship between k values of the solidified silt soil and polymer contents under 8% water content

3 高聚物固化粉土微观分析

前文分别讨论了高聚物掺量、粉土含水率、养护

龄期对固化土无侧限抗压强度及渗透系数的影响,这些宏观性能的改变往往由微观特性引起,因此从微观角度分析固化土的性质具有重要意义.

3.1 SEM结果及分析

图7为高聚物对粉土不同作用形式的SEM图像.由图7可见:

(1)含水率8%、未掺高聚物的粉土中土颗粒分布松散,孔隙较大,土颗粒在震动、挤压等外力作用下仍具有可压缩变形的能力.

(2)高聚物固化土的作用形式分为3种:一是如图7(b)所示,高聚物“覆盖”并“包裹”土颗粒,相互连接形成分布面积较大的片状,并黏附于土颗粒上,形成一层不透水、不透气的“薄膜”,同时由于该层不透水膜的存在,减弱了水在粉土内的渗透能力,从而降低了粉土的渗透性;二是如图7(c)所示,高聚物填充于相邻土颗粒之间的缝隙中,黏连了相邻的土颗粒,提高了土体的密实度;三是如图7(d)所示,高聚物黏连相邻的土颗粒,虽然没有完全填充土颗粒间的孔隙,但是通过“桥接”的方式,形成高聚物骨架.高聚物正是通过以上3种作用方式,从而大大提高土的强度与抗渗性^[21-24].

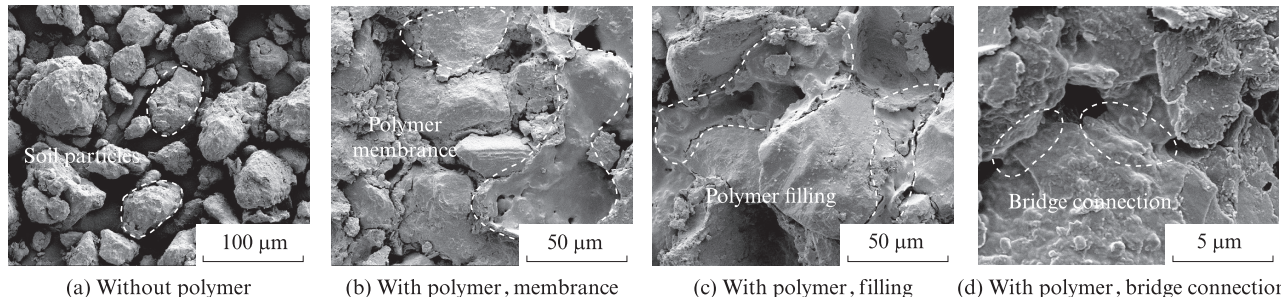


图7 高聚物对粉土不同作用形式的SEM图像
Fig. 7 SEM images of different polymer interaction forms

3.2 EDS结果及分析

图8为素土及高聚物固化土试样表面的元素分布.由图8可见,掺入高聚物后,固化土颗粒表面C、N、O的含量明显增加.这是因为高聚物是有机高分子化合物,其中的异氰酸酯($R-N=C=O$)和多元醇($nHO-OH$)均具有较高的C、N、O含量,这3个元素含量的增加,表明聚合物已经有效地附着在土颗粒的表面.

3.3 XRD结果及分析

图9为素土及高聚物固化土的XRD图谱.由图9可见,掺入高聚物前后,试样并没有出现新的衍射峰,只是衍射峰强度略有波动.这表明在将高聚物掺入到粉土中之后,土壤的矿物组成没有改变,并没有

形成新的物质.衍射峰强度不同的原因是由于测试的是2个样品且位置随机,因此物质在粉土中的分布不同,导致衍射峰强度不同.由此可以判断,在粉土和高聚物之间没有发生化学反应,也未产生新的化合物.

3.4 MIP结果及分析

孔隙结构特征对粉土的强度有着重要的影响,而高聚物的掺入会改变粉土的孔隙特征,因此研究高聚物掺入前后粉土孔隙结构的变化,对揭示高聚物固化机制有重要的意义.

图10为含水率为8%时不同高聚物掺量试样的孔隙直径分布图,MIP试验同时获得的其他物理特性如表4所示.其中,Natural silt soil是现场取样的粉

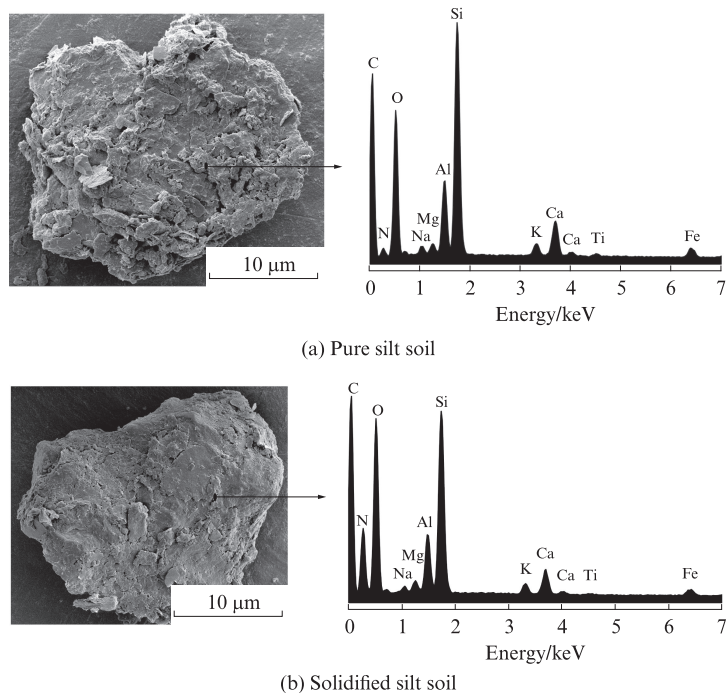


图8 素土及高聚物固化土试样的EDS测试结果

Fig. 8 EDS test results of pure and solidified silt soil samples

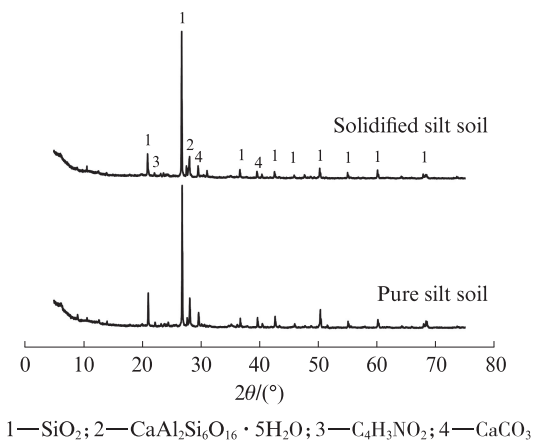


图9 素土及高聚物固化土的XRD图谱

Fig. 9 XRD patterns of pure silt soil and solidified silt soil

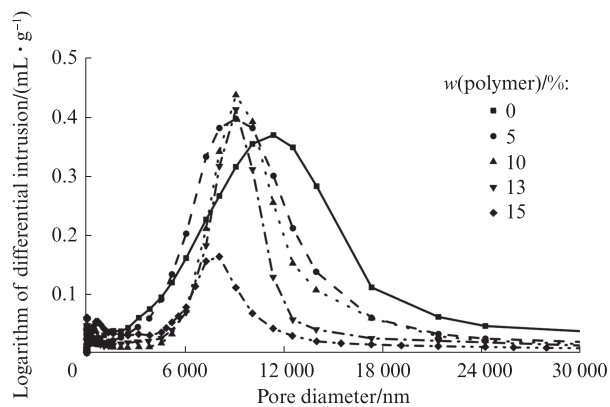


图10 含水率为8%时不同高聚物掺量试样的孔隙直径分布图

Fig. 10 Pore diameter distribution diagram of samples with different polymer contents under 8% water content

土, Remoulded silt soil是将现场取样粉土筛分、压实成型后的土样. 由图10可见, 固化土的中间孔径随着高聚物掺量的增加逐渐减小, 总孔容积也随着高聚物掺量的增加逐渐降低, 说明高聚物掺量越高, 土质越致密.

由表4可见: 高聚物掺量为15%试样的堆积密度更大, 表明其更致密; 孔隙率的显著降低也表明了随着高聚物掺量的增加, 土质越来越致密.

由以上分析可知, 高聚物固化土高效可行, 可以通过降低土体孔隙率进而明显提高土体的强度.

表4 不同高聚物掺量试样的物理性质

Table 4 Physical properties of samples with different polymer content

w(polymer)/%	Porosity(by volume)/%	Bulk density/(g·cm ⁻³)
0(natural silt soil)	46.51	1.49
0(remoulded silt soil)	39.25	1.56
5	34.44	1.62
10	31.31	1.62
13	26.54	1.71
15	26.15	1.77

4 结论

(1) 高聚物能够对粉土进行有效固化, 明显提升粉土的无侧限抗压强度. 固化土的无侧限抗压强度

随着高聚物掺量的增加而提高,随粉土含水率的增加而减小,随着养护时间的延长而提高.高聚物掺量为15%、粉土含水率为8%固化土的28 d无侧限抗压强度为6.24 MPa.

(2)高聚物掺入粉土中后,并没有与粉土颗粒发生化学反应,而是通过“覆盖”、“填充”和“桥接”等作用来填充、挤密、连接粉土,形成较大的土颗粒团聚体,提高了粉土的密实度,充分填充了大孔隙,从而提高了粉土的强度.

(3)当粉土含水率为8%、高聚物掺量为15%时,固化土的性能优异,为较优的固化土配合比.

参考文献:

- [1] 朱志铎,郝建新.粉土固化剂研制的试验研究[C]//第三届全国岩土与工程学术大会.成都:四川科学技术出版社,2009:618-621.
ZHU Zhiduo, HAO Jianxin. Experimental study on preparation of silt hardener[C]//The 3rd Conference of Geo-Engineering, China. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2009: 618-621. (in Chinese)
- [2] 储诚富,洪振舜,刘松玉,等.用似水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测[J].岩土力学,2005(4):645-649.
CHU Chengfu, HONG Zhenshun, LIU Songyu, et al. Prediction of unconfined compressive strength of cemented soils with quasi-water-cement ratio[J]. Rock & Soil Mechanics, 2005(4): 645-649. (in Chinese)
- [3] 李学德,林庆梅,彭旭华,等.水泥固化土抗冻性能影响因素分析[J].人民珠江,2020,41(12):72-77.
LI Xuede, LIN Qingmei, PENG Xuhua, et al. Analysis on the factors influencing frost resistance of cement-stabilized soil[J]. Pearl River, 2020, 41(12):72-77. (in Chinese)
- [4] 刘霖,张永鹏,魏中曹.水泥固化煤化工废渣盐污染土强度及孔隙特性[J].内蒙古工业大学学报(自然科学版),2020,39(6):463-468.
LIU Lin, ZHANG Yongpeng, WEI Zhongcao. Strength and pore characteristics of cement solidified soil contaminated with salts of coal chemical wastes and residues[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science), 2020, 39(6): 463-468. (in Chinese)
- [5] 樊恒辉,吴普特,高建恩,等.水泥基土壤固化剂固化土的微观结构特征[J].建筑材料学报,2010,13(5):669-674.
FAN Henghui, WU Pute, GAO Jian'en, et al. Microstructure characteristics of soil stabilized with cement-based soil stabilizer[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(5):669-674. (in Chinese)
- [6] ZENG L L, BIAN X, ZHAO L, et al. Effect of phosphogypsum on physiochemical and mechanical behaviour of cement stabilized dredged soil from Fuzhou, China[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2021, 25:100195.
- [7] KOLIASS, KASSELORI-RIGOPOULOU, KARAHALIOS A. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(2): 301-313.
- [8] CHENG Y Z, WANG S, LI J, et al. Engineering and mineralogical properties of stabilized expansive soil compositing lime and natural pozzolans[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 1031-1038.
- [9] RIOS S, RAMOS C, VDF ANTÓNIO, et al. Mechanical and durability properties of a soil stabilised with an alkali-activated cement [J]. European Journal of Environmental & Civil Engineering, 2017, 23(1):1-23.
- [10] 张国防,王博,张海旭,等.OPC-GBFS-NS体系土体硬化剂固化土壤的作用效果研究[J].建筑材料学报,2022,25(1):61-67.
ZHANG Guofang, WANG Bo, ZHANG Haixu, et al. Effects of OPC-GBFS-NS system based soil stabilizer on soil stabilization [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(1): 61-67. (in Chinese)
- [11] 俞家人,陈永辉,陈庚,等.地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析[J].建筑材料学报,2020,23(2):364-371.
YU Jiaren, CHEN Yonghui, CHEN Geng, et al. Mechanical behaviour of geopolymer stabilized clay and its mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):364-371. (in Chinese)
- [12] 倪宏革,周红.膨胀土固化材料的分类与固化机理[J].路基工程,2007(6):21-23.
NI Hongge, ZHOU Hong. Classification and solidified mechanism of expansive soil curing materials[J]. Subgrade Engineering, 2007(6):21-23. (in Chinese)
- [13] 力乙鹏,李婷.土壤固化剂的固化机理与研究进展[J].材料导报,2020,34(增刊2):1273-1277,1298.
LI Yipeng, LI Ting. Stability mechanism and research progress of soil stabilizer[J]. Materials Reports, 2020, 34 (Suppl 2): 1273-1277, 1298. (in Chinese)
- [14] 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 Jin, ZHANG Da, WANG Yong, et al. Reinforcement mechanism of soil slope surface with polymer soil stabilizer and its application[J]. Journal of Earth Sciences & Environment, 2016, 38(3):420-426. (in Chinese)
- [15] 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(增刊2):2883-2887.
WANG Yinmei, SUN Guanping, CHEN Wenwu, et al. Strength characteristics of sand fixated by SH[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (Suppl 2): 2883-2887. (in Chinese)
- [16] 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(14):2554-2559.
WANG Yinmei, YANG Chongcun, CHEN Wenwu, et al. Strength characteristics and mechanism of loess solidified with new polymer materialsh[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(14):2554-2559. (in Chinese)
- [17] 刘宏伟.SH及石灰固化土吸水性和失水性能研究[D].兰州:兰州大学,2019.
LIU Hongwei. Study on water absorption and water loss

- performance of SH and lime solidified soil[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. (in Chinese)
- [18] 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(1): 42-45.
- WU Shufang, WU Pute, FENG Hao. A study on influence of macromolecule polymers to soil physical properties[J]. Bulletin of Soil & Water Conservation, 2003(1): 42-45. (in Chinese)
- [19] CALLEBAUT F, GABRIELS D, BOODT M D. The effect of polymer structure on soil physico-chemical properties and soil water evaporation [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 1979, 29(12): 723-729.
- [20] 刘建成. 高性能聚氨酯砂土固结材料研究与应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- LIU Jiancheng. Research on high performance polyurethane used for sandy soil solidification and its application[D]. Chengdu : Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [21] 吕昭元, 杨强, 余利军, 等. 固废基硫铝酸盐水泥固化低液限粉土的试验研究[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 265-269.
- LÜ Zhaoyuan, YANG Qiang, YU Lijun, et al. Experimental study on solidification of low liquid limit silt with solid waste based sulfoaluminate cement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1): 265-269. (in Chinese)
- [22] PU S Y, ZHU Z D, WANG H R, et al. Mechanical characteristics and water stability of silt solidified by incorporating lime, lime and cement mixture, and SEU-2 binder [J]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 111-120.
- [23] 陶高梁, 吴小康, 杨秀华, 等. 水泥土的孔隙分布及其对渗透性的影响[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1243-1249.
- TAO Gaoliang, WU Xiaokang, YANG Xiuhua, et al. Pore distribution of cement-soil and its effect on permeability [J]. Journal of Engineering Geology, 2018(5): 1243-1249. (in Chinese)
- [24] 李迎春, 钱春香, 刘松玉, 等. 粉土固化稳定机理研究[J]. 岩土工程学报, 2004(2): 268-271.
- LI Yingchun, QIAN Chunxiang, LIU Songyu, et al. Mechanism of silt stabilization [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(2): 268-271. (in Chinese)

(上接第 590 页)

- of iron tailing sand cement based grouting material[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4): 538-544. (in Chinese)
- [3] SHETTIMA A U, HUSSIN M W, AHMAD Y, et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 120(1): 72-79.
- [4] LIU J H, ZHOU Y C, WU A X, et al. Reconstruction of broken Si-O-Si bonds in iron ore tailings (IOTs) in concrete [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2019, 26(10): 1329-1336.
- [5] ZHANG Y S, SUN W, LI J Z. Hydration process of interfacial transition in potassium polysialate (K-PSDS) geopolymer concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 57(1): 33-38.
- [6] PENG H, CUI C, CAI C S, et al. Microstructure and microhardness property of the interface between a metakaolin/GGBFS-based geopolymer paste and granite aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2019, 221(10): 263-273.
- [7] LEE W K W, DEVENTER J S J V. Chemical interactions between siliceous aggregates and low-Ca alkali-activated cements [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(6): 844-855.
- [8] NICOLAS R S, BERNAL S A, GUTIERREZ R M, et al. Distinctive microstructural features of aged sodium silicate-activated slag concretes [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 65(1): 41-51.
- [9] 陈永亮, 武诗怡, 齐辰晖. 铁尾矿-偏高岭土基地质聚合物配方及优化机理[J]. 金属矿山, 2019(4): 199-203.
- CHEN Yongliang, WU Shiyi, QI Chenhui. Formulation optimization and mechanism of preparing geopolymers based on iron tailings and metakaolin [J]. Metal Mine, 2019(4): 199-203. (in Chinese)
- [10] LLOYD R R, PROVIS J L, DEVENTER J S J V. Acid resistance of inorganic polymer binders. 1. Corrosion rate [J]. Materials and Structures, 2012, 45(1): 1-14.
- [11] KONG L J, HOU L R, DU Y B. Chemical reactivity of lightweight aggregate in cement paste [J]. Construction and Building Materials, 2014, 64(1): 22-27.
- [12] 刁益彤, 麻海燕, 余红发, 等. 珊瑚混凝土骨料-净浆界面区强度试验研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 516-524.
- DIAO Yitong, MA Haiyan, YU Hongfa, et al. Experimental study on strength of aggregate-paste interface transition zone of coral concrete [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 516-524. (in Chinese)