

文章编号:1673-9469(2021)02-0072-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.02.012

一种非传统高分子粘结剂改良黏土的强度试验研究

李明阳, 祁长青*, 卜凡, 王梓, 卢洪宁
(河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 211100)

摘要: 通过室内无侧限抗压强度试验和直接剪切试验研究了不同浓度粘结剂对黏土强度的影响。试验结果表明, 粘结剂的加入可以提高黏土体的强度。改良后, 黏土的无侧限抗压强度和黏聚力随养护时间的增加均有提高; 当养护时间一定时, 随着粘结剂含量的增加, 黏土的黏聚力和无侧限抗压强度也随之增加, 当浓度增加至3%时, 黏土的无侧限抗压强度相比2%浓度添加量出现下降。

关键词: 黏土; PVAc型粘结剂; 无侧限抗压强度; 抗剪强度

中图分类号: TU411.4

文献标识码: A

Experimental Study on Strength of Clay Improved by a Non-Traditional Polymer Binder

LI Mingyang, QI Changqing*, BU Fan, WANG Zi, LU Hongning
(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: The effect of different concentration of PVAc binder on the strength of clay was studied by unconfined compressive strength test and direct shear test. The test results show that: PVAc binder can improve the strength of clay; the unconfined compressive strength and shear strength of clay improved by PVAc binder increase with the increase of curing time; When the curing time is fixed, the cohesion and unconfined compressive strength of clay increase with the increase of PVAc binder content. While the concentration increases to 3%, the unconfined compressive strength of clay decreases compared with 2% concentration.

Key words: clay; PVAc binder; unconfined compressive strength; shear strength

黏土工程力学特性较差, 易形变^[1-4]。在工程实践中, 常需要改善黏土的工程力学特性。工程中采取的土体改良方法多种多样, 如化学添加剂、再湿润、土壤置换、压实等。然而以上这些方法往往存在着成本高、效率低和持久性差等缺点^[5]。应用稳定剂是改良土体性能的常用手段。在传统工程中, 应用水泥与石灰粘结剂是一项成熟技术。然而这两类粘结剂会造成土壤的高刚性和高脆性^[6], 同时不利于工程周边环境的生态修复进程。

随着国家对环保型工程建设的日益注重, 生态友好型的工程地质手段越来越受到重视。其中, 添加水溶性化合物型粘结剂改良土体性能是一种常见的工程手段。目前添加水溶性化合物型

粘结剂作为一种土体改良方式已经成为工程地质研究领域的研究热点^[7-10]。PVAc(聚醋酸乙烯酯)是一种水溶性高分子聚合物, 相比多种同类粘结剂, 价格便宜, 适用于大规模工程应用。在土体性能研究中, PVAc可作为一种非传统的土体粘结剂, 应用于多项改善土体性能的工程实践和试验研究中^[11-12], 这些研究表明了PVAc可对土体的多项工程力学性质产生有利影响, 反映了PVAc在工程地质领域的应用潜力。为了进一步研究PVAc型粘结剂对黏土强度的影响, 探讨其工程应用价值, 本研究以PVAc型粘结剂改良黏土, 并针对粘结剂浓度和养护时间两种变量进行室内无侧限抗压强度试验和直接剪切试验, 以研究粘结剂改良

收稿日期: 2021-05-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41877212)

作者简介: 李明阳(1999-), 男, 河南漯河人, 硕士研究生, 主要从事土体改良与边坡治理研究工作。

* 通讯作者: 祁长青(1979-), 男, 江苏徐州人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程和地质工程的教学和科研工作。

表 1 试验所用 PVAc 的理化参数

Tab. 1 Physical parameters of clay for test

物理状态	溶解性	pH	沸点/°C	密度/(g·cm ⁻³)	黏度/(MPa·s)	总固体含量/%
白色粘稠液体	可溶	6~7	100	1.05	400	41

黏土的最佳方案。

1 试验方案

1.1 试验材料

PVAc 是一种有机水溶性聚合物,其主要成分为乙酸乙烯酯聚合物。PVAc 的具体理化参数如表 1 所示。

本试验所用土样采自南京市江宁区,将土样置于烘干箱中以 110 °C 烘干 10 h 后粉碎,过 2 mm 标准筛后备用。所用黏土物性参数如表 2 所示。

表 2 试验所用土样的物性参数

Tab. 2 Physical parameters of clay for test

最优含水率	最大干密度	液限	塑限	比重
$\omega/\%$	$/(g\cdot cm^{-3})$	$\omega_L/\%$	$\omega_p/\%$	G
20.3	1.65	40.2	23.8	2.65

1.2 试验步骤

1.2.1 直接剪切试验

为研究粘结剂浓度对改良黏土抗剪强度参数的影响,设置粘结剂含量为 0%,1%,2%,3%。将稀释至相应浓度的粘结剂溶液与烘干过筛后的黏土颗粒混合均匀,制成含水率为 20% 的土样。取

适量土样置于专用压实设备,制成高为 20 mm,直径为 61.8 mm 的直接剪切样。最后将制得试样置于室内 25 °C 恒温环境下分别湿养 1、3、5、9 d。剪切过程中施加的轴向压力分别为 100、200、300、400 kPa,剪切速率为 0.024 mm/s。

1.2.2 无侧限抗压强度试验

为研究粘结剂浓度对改良黏土无侧限抗压强度的影响,土样配置与直接剪切试验一致。制成高为 80 mm,直径为 39.1 mm 的无侧限抗压强度试样。将制得试样置于 25 °C 恒温环境下使用保鲜膜包裹,分别养护 1、3、5、9 d。所用仪器为 YYW-2 型微机控制式三轴仪,加载速率为 0.06 mm/s。

2 试验结果及分析

2.1 直接剪切试验

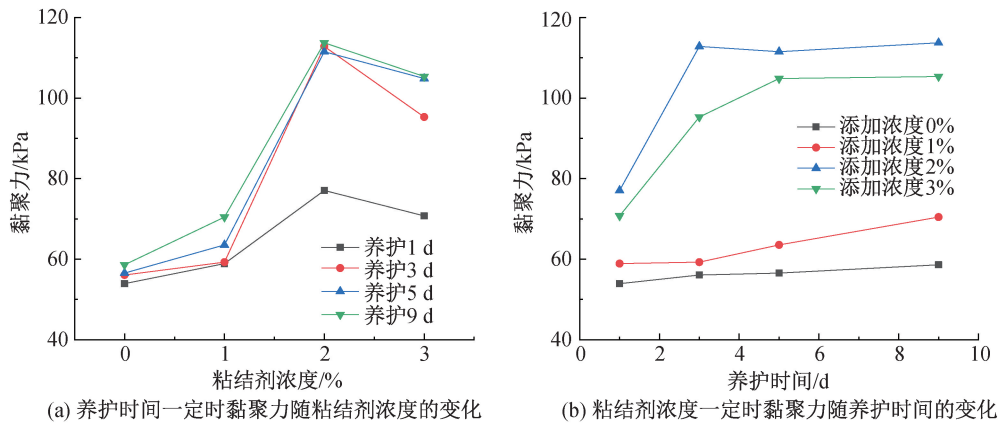
通过直接剪切试验对改良黏土抗剪强度参数进行研究,得到粘结剂含量和养护时间与试样抗剪强度指标之间的关系如表 3 所示。

图 1(a) 为定养护时间时,试样黏聚力与粘结剂浓度之间的关系。当养护时间一定时,添加粘结剂可以提高试样的黏聚力。且当添加浓度不超

表 3 试样在不同粘结剂浓度及养护时间下的黏聚力(kPa)及内摩擦角(°)

Tab. 3 Cohesion (kPa) and internal friction angle (°) of samples under different binder concentration and curing time

试样 编号	粘结剂 浓度/%	养护时 间/d	各级法向应力下抗剪强度/kPa				黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
			100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa		
1	0	1	74.34	106.69	128.64	147.52	53.93	13.58
2		3	82.492	102.637	124.674	155.471	56.08	13.55
3		5	84.11	109.34	134.57	164.47	56.54	14.59
4		9	89.14	105.80	140.34	166.88	58.60	14.99
5	1	1	81.863	108.81	138.77	154.72	58.91	13.96
6		3	81.22	115.94	136.34	159.83	59.27	14.37
7		5	97.19	117.75	134.57	185.03	63.55	15.66
8		9	96.287	131.63	157.586	183.29	70.46	16.01
9	2	1	70.38	91.69	113.99	127.30	77.06	13.87
10		3	139.91	162.806	196.306	217.006	112.81	14.83
11		5	137.05	172.11	207.17	223.23	111.49	16.36
12		9	143.97	173.73	192.49	234.25	113.71	16.15
13	3	1	93.165	120.58	148.99	165.41	70.75	13.77
14		3	119.56	149.843	167.133	198.423	95.27	14.25
15		5	126.51	165.595	185.135	208.955	104.83	14.94
16		9	130.479	161.62	189.77	211.92	105.33	15.24



(a) 养护时间一定时黏聚力随粘结剂浓度的变化

(b) 粘结剂浓度一定时黏聚力随养护时间的变化

图1 不同试样黏聚力变化

Fig. 1 Cohesion of different samples

过2%时,粘结剂浓度与试样的黏聚力呈非线性正相关。同时,各养护时间组所对应黏聚力增量主要发生在粘结剂浓度为2%时,这表明当添加浓度为2%时,粘结剂对PVAc黏聚力的改良效果最好。而当粘结剂浓度为3%时,相比2%添加浓度试样,其对黏聚力的增强效果会变差。

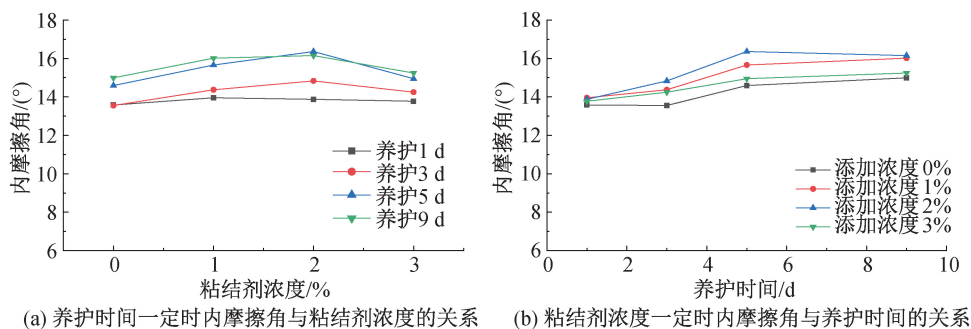
图1(b)为定添加浓度时,试样黏聚力和养护时间之间的关系。可见在不同粘结剂浓度下,养护时间对黏聚力的影响规律有显著差异。未添加粘结剂时,试样的黏聚力变化与养护时间之间缺乏相关性;添加浓度为1%时,试样的黏聚力与养护时间之间整体上呈非线性正相关,但相关性较差。当粘结剂浓度为2%、3%时,试样黏聚力与养护时间呈显著的非线性正相关。同时各养护时间组所对应的黏聚力增量主要发生在养护1~5 d期间。土壤的黏聚力主要受含水率和各种物理化学作用、胶结作用的影响。当添加浓度为0%、1%时,含水率对试样黏聚力的影响占主要作用。在恒温湿养条件下,试样的含水率几乎没有变化。因此测得试样黏聚力结果与养护时间呈弱相关性。当添加浓度为2%、3%时,土壤的黏聚力主要受粘结剂与土壤间的物理化学作用和胶结作用等的控

制。随着养护时间的增加,粘结剂分子与土壤黏粒之间的反应逐渐充分。因此试样黏聚力结果与养护时间呈一定的正相关性。

图2为定养护时间,定浓度时,试样内摩擦角与粘结剂浓度和养护时间之间的关系。两组试验结果极差均小于3°。可见粘结剂浓度和养护时间与试样内摩擦角变化的相关性均微弱。土体的内摩擦角取决于土体的内摩擦力、土壤颗粒间的表面摩擦力、咬合力等。黏土本身的性质对其内摩擦角的影响占主要因素。养护时间和粘结剂浓度造成的黏土内摩擦角变化有限。

2.2 无侧限抗压强度试验

粘结剂含量和养护时间与试样无侧限抗压强度关系如表4所示。图3(a)表明养护时间一定时,粘结剂的加入可以提高试样的无侧限抗压强度。水溶性聚合物改良土体时,其对土体的稳定机理可大致概括为孔隙填充作用、物理化学反应作用和包裹作用^[14]。在适当范围内($\leq 2\%$),当粘结剂浓度增加时,PVAc分子与黏土混合后能更充分地填充黏土颗粒间的孔隙、与黏土颗粒之间发生物理化学作用的速率更高、同时更容易形成薄



(a) 养护时间一定时内摩擦角与粘结剂浓度的关系

(b) 粘结剂浓度一定时内摩擦角与养护时间的关系

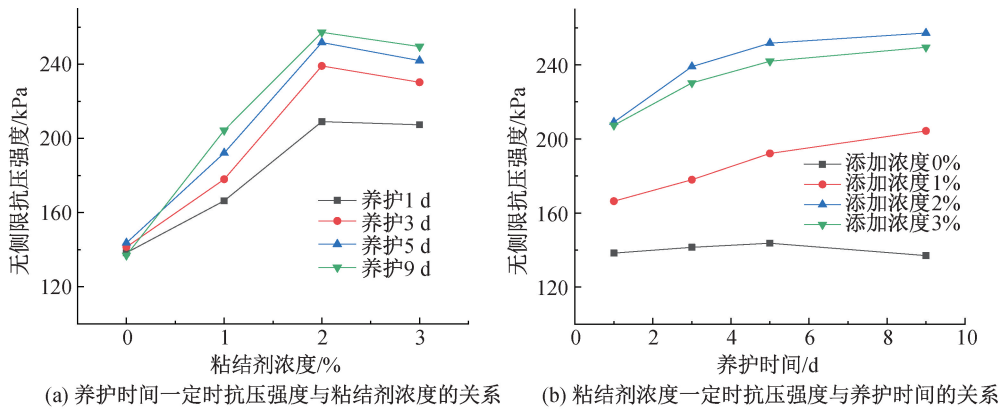
图2 不同试样的内摩擦角变化

Fig. 2 Internal friction of different samples

表 4 试样在不同粘结剂浓度及养护时间下的无侧限抗压强度(单位:kPa)

Tab. 4 Unconfined compressive strength of samples under different binder concentration and curing time (unit:kPa)

试样编号	粘结剂浓度/%	养护时间/d	无侧限抗压强度/kPa	增强效果/%	对应应变/%	最终含水率/%
1	0	1	138.34	0	7.00	18.98
2		3	141.45	0	5.25	18.63
3		5	143.66	0	5.75	18.57
4		9	137.00	0	5.25	18.06
5	1	1	166.37	20.26	7.50	19.27
6		3	178.00	25.84	6.00	18.21
7		5	192.18	33.77	5.50	18.17
8		9	204.34	49.15	7.25	17.99
9	2	1	209.03	51.10	8.00	20.02
10		3	239.09	69.03	6.50	19.50
11		5	251.74	75.23	7.25	19.47
12		9	257.21	87.75	6.50	19.35
13	3	1	207.37	49.90	7.00	19.21
14		3	230.27	62.83	7.75	19.61
15		5	241.94	68.41	7.75	19.43
16		9	249.51	82.12	8.25	19.71



(a) 养护时间一定时抗压强度与粘结剂浓度的关系 (b) 粘结剂浓度一定时抗压强度与养护时间的关系

图 3 不同试样的无侧限抗压强度变化

Fig. 3 Unconfined compressive strength of different samples

膜状结构包裹黏粒团聚体。这些微观因素均会提高土体的抗压强度。当粘结剂浓度为 3% 时,相比 2% 添加量,试样的无侧限抗压强度有所降低。

图 3(b) 为粘结剂浓度一定时,养护时间对试样无侧限抗压强度的影响。可见在不同粘结剂浓度下,养护时间对黏聚力的影响规律有显著差异。当未添加粘结剂时,试样无侧限抗压强度与养护时间之间相关性微弱;当添加粘结剂时,试样无侧限抗压强度与养护时间呈非线性正相关。因为素土试样的无侧限抗压强度主要受土体本身性质和含水率控制。在恒温湿养条件下,各养护时间组试样的最终含水率极差为 0.98%,含水率差异轻微。添加粘结剂后,随着养护时间的增加,粘结剂分子与土壤黏粒之间的反应逐渐充分。因此试样黏聚力结果与养护时间呈一定的正相关性。

2.2.1 应力-应变曲线分析

试样的应力-应变曲线形态与粘结剂含量和养护时间密切相关。图 4 为定养护时间下试样的应力-应变曲线。取轴向应变为 0% 至试样达到最大轴向应力所对应的峰值应变之间的割线模量为考察数据。当添加剂浓度不超过 2% 时,随着粘结剂浓度增加,试样的峰值应变和弹性模量显著提高。当添加浓度为 3% 时,养护 1 d 试样弹性模量为 29.62 MPa,高于 2% 添加量组试样的 26.13 MPa;养护 3、5、9 d 试样所对应的弹性模量分别为 29.71、31.22、30.24 MPa,低于 2% 添加量组试样的 36.78、34.72、39.57 MPa。粘结剂与土体之间的反应速率与粘结剂的浓度有关。较短养护时间内,高浓度粘结剂与土体之间的反应更加充分,因此养护 1 d 组 3% 添加浓度试样拥有比 2% 浓度试

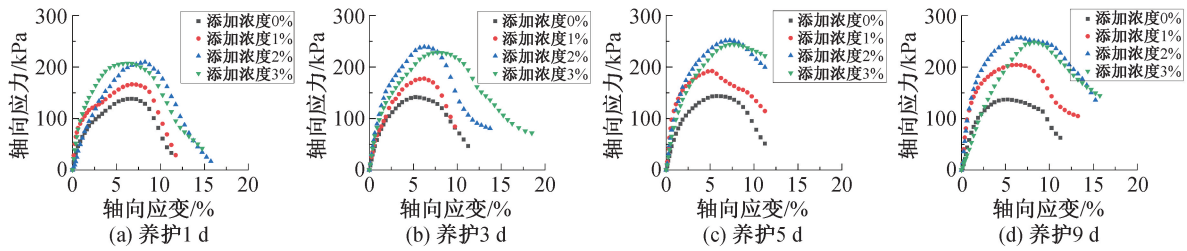


图4 固定养护时间下试样的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of samples under constant curing time

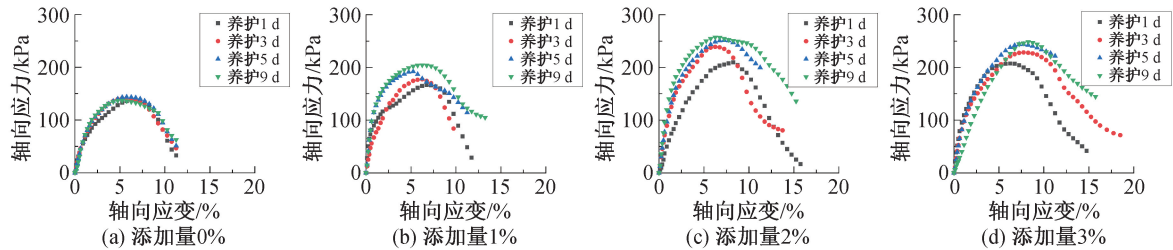


图5 固定浓度下试样的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of samples under constant concentration

样更强的抵抗弹性变形能力。养护时间充分后,高粘结剂浓度带来的黏土颗粒团聚、试样整体性变差等因素的影响权重提高,使得养护 3、5、9 d 下 3% 添加量的试样抵抗弹性变形的能力降低。

图 5(a) 表明素土试样的应力-应变曲线形态趋于一致。这是因为恒温湿养条件下,试样的最终含水率几乎不随养护时间发生变化。在添加粘结剂后,随着养护时间的增加,PVAc 分子与黏土颗粒之间的反应充分程度增大,试样的整体强度提高,在应力-应变曲线上表现为试样的峰值应变和弹性模量均发生提高。

2.2.2 变形破坏形态分析

进行无侧限抗压强度试验时,试样在垂向荷载下会出现明显的剪切带形,土体破坏实际上集中于土样的剪切带部位,其他部位则破坏程度较小^[13]。土体的变形破坏形态与土体特性有较大相关。

图 6(a) 中一条平直均匀的破坏裂隙自上而下贯通整个试样,侧胀现象微弱。试样变形破坏形态接近脆性破坏。由图 6(b) — (d) 可知,添加粘结剂后,试样破坏裂隙贯通性变差、主级破坏裂隙退化或消失、次级裂隙发育,且试样发生明显的侧胀现象。这是因为粘结剂加入后通过孔隙填充、物理化学反应和包裹作用增强了试样的抵抗破坏变形能力。这种强化效果随着粘结剂浓度的增加而增强,在 2% 添加浓度时达到最佳效果。如图 6(c) 所示,试样的主级破坏裂隙已强烈退化,细小曲折,贯通性差。试样表面细密裂纹发育。

图 7(a) 中,试样破坏时发生轻微侧胀,主级破坏裂隙由下至上贯穿试样 4/5 长度,张开均匀,发育明显。随着养护时间的增加,试样主级裂隙逐渐退化,次级裂隙发育。直至养护 9 d,如图 7(d) 所示。试样破坏后,表面包络状细密裂纹发育,主

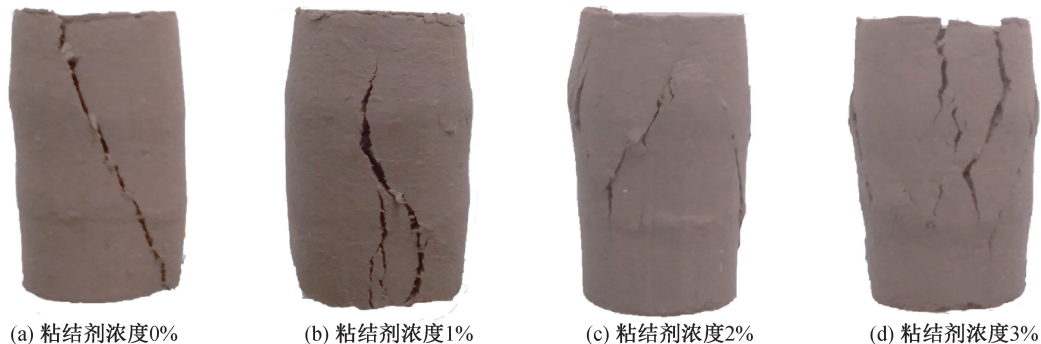


图6 养护 1 d 时间下不同粘结剂浓度试样变形破坏形态

Fig. 6 Deformation and failure modes of samples under constant curing time

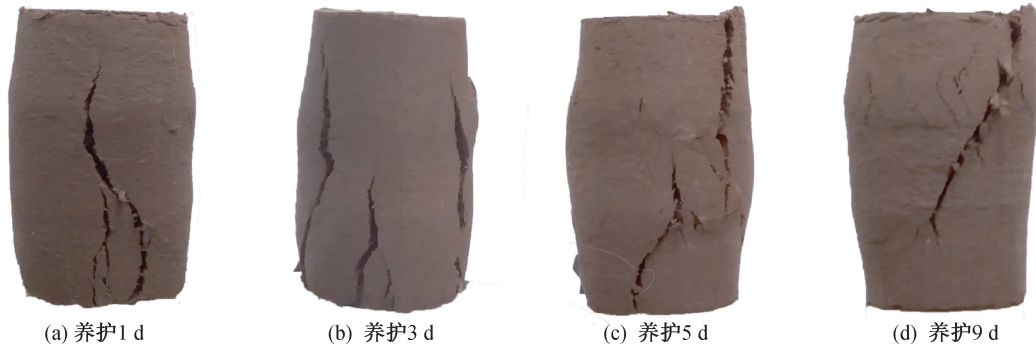
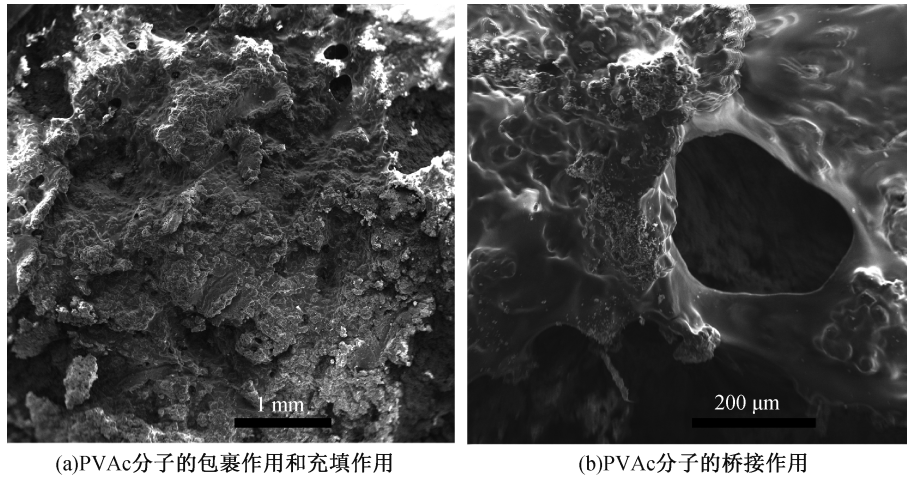


图 7 浓度 1% 下不同养护时间组试样变形破坏形态

Fig. 7 Deformation and failure modes of samples under constant concentration



(a)PVAc分子的包裹作用和充填作用

(b)PVAc分子的桥接作用

图 8 添加 PVAc 型粘结剂后黏土扫描电镜照片

Fig. 8 SEM photos of clay improved by PVAc binder

级破坏裂隙面粗糙,沿主裂隙面有细密裂隙发育。在不同养护时间下,各试样含水率变化不大,随着养护时间的增加,粘结剂与土体颗粒的反应程度更加充分。试样的整体性随之更强。

3 机理分析

图 8 为 PVAc 型粘结剂改良黏土的扫描电镜照片。图 8(a)表现出了 PVAc 分子在黏土颗粒表面的包裹作用和充填作用。PVAc 分子形成的三维膜结构包裹在黏土颗粒表面,提高了试样的整体强度。图 8(b)表现出了 PVAc 分子在不同黏土颗粒聚集体之间的桥接作用。PVAc 分子通过一系列物理化学键与黏土颗粒表面相连接,形成桥接作用,使得黏土的整体性和稳定性增强。

PVAc 包含有大量的-COOH 官能团。粘结剂分子中的官能团能与黏土颗粒中的吸附性离子发生化学反应,在 PVAc 分子和黏土颗粒之间创建一系列氢键、离子键和范德华键。通过这些

键,PVAc 长链大分子形成兼具黏性和弹性的膜结构。这些膜结构限制了黏土颗粒的位移。随着粘结剂浓度的增加,PVAc 分子与黏土颗粒之间相互作用形成的交联体相互缠绕结合的可能性也随之增加,从而在土体内部形成更完整的膜结构。因此理论上粘结剂浓度越高,黏土的整体性和稳定性越强。在实际试验操作过程中,高浓度 PVAc 溶液中 PVAc 长链大分子之间彼此勾连缠绕,呈半凝胶态。经充分搅拌后,溶液无法充分分散在黏土颗粒之间,形成了分布不均匀的黏结核。制样过程中黏土颗粒围绕黏结核发生团聚现象。图 9 为不同粘结剂添加量下一组干养 20 d 的直剪留存样的平面视图。图 9(a)为添加量 3% 的留存样平面图,图 9(b)为添加量 1% 的留存样平面图。可见 3% 添加量下试样中黏土颗粒出现团聚现象,形成 1~3 mm 团聚体。这些团聚体彼此之间关联性差,破坏了制得试样的整体性,使得试样的强度特性相比 2% 添加量的试样有所降低。

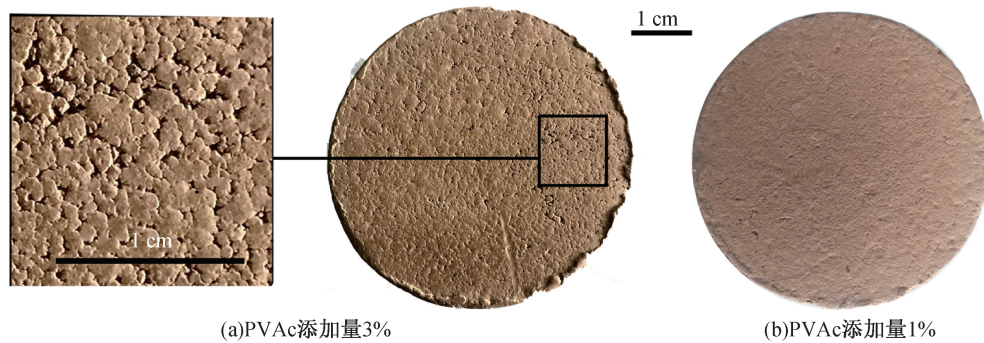


图9 不同粘结剂浓度下保留直剪试样的顶视图

Fig. 9 Top view of retained direct shear samples with different stabilizer concentrations

4 结论

本文通过直接剪切试验和室内无侧限抗压强度试验研究粘结剂不同添加浓度对黏土强度的影响,得出结论如下:

1) PVAc型粘结剂的加入能够提高黏土的无侧限抗压强度和黏聚力。添加浓度不超过2%时,随着粘结剂浓度的增加,黏土的无侧限抗压强度和黏聚力也随之呈非线性增加。粘结剂改良黏土时的建议掺量不大于2%。

2) 当粘结剂浓度大于2%时,黏土的无侧限抗压强度和黏聚力相比2%添加浓度时会降低。这是由粘结剂高添加浓度下黏土颗粒团聚,试样整体性变差造成的。

3) 黏土本身的性质使其内摩擦角的影响占主要作用。养护时间和粘结剂浓度造成的黏土内摩擦角变化有限。

参考文献:

- [1] 吴书崇,胡敏云,张勇,等. 粉质黏土次固结特性的试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 338-342+348.
- [2] 万勇,薛强,吴彦,等. 干湿循环作用下压实黏土力学特性与微观机制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2815-2824.
- [3] 刘珊. 结构性黏土力学特性与微观形态试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [4] 胡大为. 基于干湿循环效应的红黏土力学特性与孔隙结构研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017.

- [5] ESMAEIL Masoumi, SEYED Mehdi Abtahi Forooshani, FARZAD Abdi Nian. Problematic Soft Soil Improvement with Both Polypropylene Fiber and Polyvinyl Acetate Resin [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013, 31(1): 143-149.
- [6] TAYLOR David W, KENNEDY John F. New fibres: By T. Hongu and G. O. Phillips, Ellis Horwood Ltd, Chichester [J]. Carbohydrate Polymers, 1991, 15(3): 345-346.
- [7] 冯巧,刘瑾,卢毅,等. 一种复合加固剂改良砂土强度的试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(04): 903-911.
- [8] 古佳雨,彭泽森,吴立,等. 生物聚合物对砂土强度影响的研究[C]//中国地质学会. 第十一届全国工程地质大会论文集. 北京:《工程地质学报》编辑部, 2020: 5.
- [9] CHANG Ilhan, CHO Gye-Chun. Strengthening of Korean Residual Soil with β -1, 3/1, 6-glucan Biopolymer [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30: 30-35.
- [10] 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(03): 302-306.
- [11] LIU Jin. Effect of Polyvinyl Acetate Stabilization on the Swelling-Shrinkage Properties of Expansive Soil [J]. International Journal of Polymer Science, 2017: 1-8.
- [12] BU Fan. Effects of the Preparation Conditions and Reinforcement Mechanism of Polyvinyl Acetate Soil Stabilizer [J]. Polymers, 2019, 11(3): 506.
- [13] 罗爱忠,邵生俊,方娟,等. 不同结构性黄土的单轴抗压试验及破坏模式[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(04): 74-80.

(责任编辑 王利君)