

黄原胶改良黏土无侧限抗压强度及其加固机理研究

魏世杰¹, 杨宇², 王梓¹, 刘瑾^{1*}, 何承宗¹, 张晨阳¹, 李明阳¹

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 浙江华东工程咨询有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 采用天然黄原胶对黏土进行加固, 通过一系列无侧限抗压强度试验, 对不同养护时间和黄原胶掺量条件下改良黏土的无侧限抗压强度特性进行试验研究, 并对其加固机理进行较为深入的分析。试验结果表明: 黄原胶作为添加剂可以在很大程度上提高黏土的无侧限抗压强度; 随着黄原胶掺量和养护时间的增加, 改良黏土试样的抗压强度也随之增加, 并最终趋于稳定; 黄原胶改良黏土的最适宜掺量是1.5%, 最佳养护时间是14 d, 当养护时间为14 d时, 黄原胶掺量0.5%、1.0%、1.5%和2.0%的改良黏土样抗压强度相对素土样分别增加13.43%、20.85%、29.87%和34.70%。黄原胶基质通过增强黏土颗粒相互间的粘聚作用, 增强了土样的整体性, 从而达到增强黏土样抗压强度的目的。

关键词: 黄原胶; 黏土; 养护时间; 无侧限抗压强度; 改良机理

中图分类号: TU411.6

文献标识码: A

Study on Unconfined Compressive Strength and Strengthening Mechanism of Xanthan Gum Modified Clay

WEI Shijie¹, YANG Yu², WANG Zi¹, LIU Jin^{1*}, HE Chengzhong¹, ZHANG Chenyang¹, LI Mingyang¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

2. Zhejiang Huadong Engineering Consulting Co., Ltd, Hangzhou, Zhejiang 311122, China)

Abstract: The clay was strengthened with natural xanthan gum, and the unconfined compressive strength characteristics of improved clay under different curing time and xanthan gum content were studied through a series of unconfined compressive strength tests. And the reinforcement mechanism was analyzed deeply. The test results show that xanthan gum as an additive can improve the unconfined compressive strength of clay to a great extent, and the compressive strength of improved clay samples increases with the increase of xanthan gum content and time, and finally tends to be stable. The optimum content of xanthan gum to improve clay is 1.5%, and the best curing time is 14 days. When the curing time is 14 days, the strength of the improved clay samples containing 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0% xanthan gum increase by 13.43%, 20.85%, 29.87% and 34.70% respectively. Xanthan gum matrix enhances the integrity and cohesion of soil samples by enhancing the cohesion of clay particles, so as to enhance the compressive strength of clay samples. The research results can provide a certain reference basis for the practical engineering application of clay strengthened with xanthan gum.

Key words: xanthan gum; clay; curing time; unconfined compressive strength; improvement mechanism

黏土是一种常见的建筑材料, 由于黏土具有取材方便, 价格低廉的特点, 因此在边坡、路基工程中常作为客土填料广泛使用。但是黏土本身强度较低、天然含水率高、压缩性较大, 因此要对其

加以改良才能更好地满足工程建设需求^[1-11]。黄原胶(Xanthan gum)是一种多糖, 外观为白色或淡黄色粉末, 可溶于冷水或热水, 是一种性能较为优越的生物胶, 用途极为广泛^[12]。在静态条件下, 加

收稿日期: 2021-03-05

基金项目: 江苏省自然资源科技项目(KJXM2019028); 自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心开放课题(2020)

作者简介: 魏世杰(1998-), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事土体加固研究。

* 通讯作者: 刘瑾(1983-), 女, 福建漳州人, 工学博士, 教授, 主要从事工程地质与环境岩土工程方面的研究。

表 1 试验用黏土化学成分分析结果

Tab. 1 Analysis of clay chemical composition of test

化合物名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	其他
所占质量百分比/%	61.12	14.60	10.74	2.15	2.01	1.96	1.74	1.64	4.04

入少量的黄原胶就能使液体粘稠度大幅增加。Zohuriaan 等^[13]研究发现,与其他生物胶相比,黄原胶在较宽范围的温度和酸碱度下能显示出更高的稳定性。此外,由于黄原胶作为添加剂能提供一致的流变性,黄原胶也被用于采矿和石油工业钻井泥浆的粘度增强添加剂,以及添加进混凝土中防止冲刷^[14-15]。用黄原胶作为添加剂进行土壤改良也是很多人关心的课题,如 Ilhan Chang 等^[16]研究发现黄原胶对土壤加固的影响显示出非线性增加,并在较高的黄原胶浓度下趋于平稳。Rashid 等^[3]研究发现黄原胶作为热带红土土壤的生态友好和可持续的土壤改良添加剂具有广阔的前景。综上所述,黄原胶是一种环保有效的可以应用于加固黏土的非传统改良材料,但是国内对于黄原胶加固黏土的研究较少,其对于黏土的改良效果和改良机理值得进一步研究。

本文基于室内无侧限抗压强度试验,考虑黄原胶掺量、养护时间因素两种变量,探讨黄原胶掺量和养护时间对改良黏土的无侧限抗压强度特性的影响规律,并通过扫描电镜图像分析黄原胶改良黏土的机理,为黄原胶加固黏土的实际工程应用提供一定的参考依据。

1 试验方案

1.1 试验材料与仪器

试验所用黏土取自南京某施工现场,其化学成分见表 1,物理参数见表 2。将黏土烘干、磨碎后过 2 mm 筛,密封备用。黄原胶为淡黄色粉末(图 1(a)),试验全程密封包装,随取随用避免潮湿。本次试验所用仪器为南京土壤仪器厂生产的 YYW-2 型应变控制式无侧限压力仪,剪切速率设置为 2.4 mm/min。

表 2 试验用黏土物理参数

Tab. 2 Physical parameters of clay for test

比重	最优含水	液限	塑限	最大干密度
<i>G</i>	率 $\omega_{cr}/\%$	$\omega_l/\%$	$\omega_p/\%$	$\rho_{max}/(g\cdot cm^{-3})$
2.65	20.3	52.4	23.8	1.65

1.2 试验过程

本试验将黄原胶掺量和养护时间作为变量,黄原胶掺量指黄原胶粉末与干土的质量比,分别

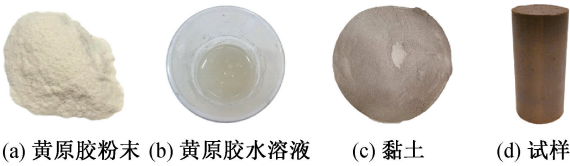


图 1 试验材料

Fig. 1 Test material

取 0.0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%;试样的养护时间分别取 0、4、7、14、28 d,以进行交叉试验。试验过程中,首先取 163.2 g 烘干磨碎后的黏土与相应掺量的黄原胶混合均匀,再称量 32.64 g 蒸馏水倒入黏土黄原胶混合物中搅拌,用手和刮刀使得黄原胶和水分均匀分布。将搅拌好的土料平分三份,依次倒入模具进行击实,每层加入需要的土重后击实到给定高度,将表面刨毛,再加入下一层土料击实。用取土器压出土样,得到高 80 mm,底面直径 39.1 mm 的标准圆柱形试样,称重后用保鲜膜包裹密封并用标签编号。本试验共计 25 组,每组制备三个平行样,置于室温条件下养护相应时间。根据《土工试验方法标准》GBT 50123—2019 进行无侧限抗压强度试验并记录试验数据,实验前对试样顶底面稍作平整保证试样受力均匀,试样破坏后测量样品的含水率,剔除水分损失太多的试样,最后取数据的平均值进行分析以减小误差,并保证每组平行样的抗压强度不超过其平均值的 10%,绘制出应力应变曲线。

2 试验结果与分析

本试验研究不同掺量的黄原胶、不同养护时间对黏土无侧限抗压强度的影响,实验结果如表 3 所示。根据得到的试验数据,以轴向应变(%)为横轴,轴向应力(kPa)为纵轴绘制应力-应变曲线。

2.1 应力应变曲线

图 2 是不同养护时间条件下,掺入不同含量黄原胶的黏土样进行无侧限抗压强度试验得到的应力应变曲线图。从图中可以看出,养护时间相同时,随着黄原胶掺量的增加,试样的抗压强度也呈上升趋势。例如养护时间为 0 d 时,素土试样的抗压强度为 110.63 kPa,掺量 0.5%、1%、1.5%、2%

表 3 不同黄原胶掺量和养护时间下的土样抗压强度(单位:kPa)

Tab. 3 Compressive strength (kPa) of soil samples with different xanthan gum content and curing time

编号	养护时间/d	黄原胶掺量/%	抗压强度/kPa	平均含水率/%	编号	养护时间/d	黄原胶掺量/%	抗压强度/kPa	平均含水率/%
1	0	0.0	110.63	20.28	16	14	0.0	269.67	19.76
2	0	0.5	117.19	20.35	17	14	0.5	305.88	19.91
3	0	1.0	133.86	20.63	18	14	1.0	325.91	19.86
4	0	1.5	150.84	20.44	19	14	1.5	350.23	19.55
5	0	2.0	162.50	20.93	20	14	2.0	363.25	19.88
6	4	0.0	142.15	20.33	21	28	0.0	276.78	19.81
7	4	0.5	154.74	20.38	22	28	0.5	311.67	19.15
8	4	1.0	167.91	20.15	23	28	1.0	332.32	19.06
9	4	1.5	225.33	20.52	24	28	1.5	355.34	19.36
10	4	2.0	251.03	20.80	25	28	2.0	382.16	19.38
11	7	0.0	228.92	19.83					
12	7	0.5	242.69	19.96					
13	7	1.0	261.01	20.09					
14	7	1.5	279.21	20.05					
15	7	2.0	300.76	20.23					

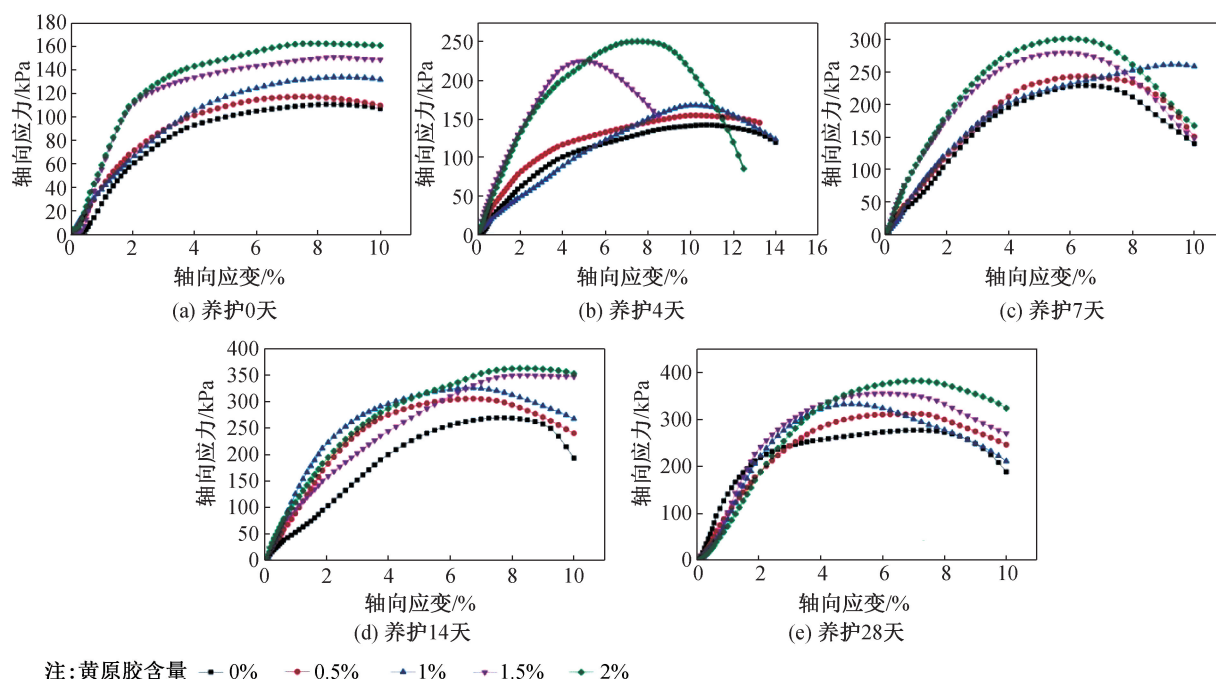


图 2 应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves

的试样抗压强度分别为 117.19、133.86、150.84、162.50 kPa, 相对素土试样分别提升了 5.93%、21%、36.34%、46.88%。其中 2% 掺量的试样抗压强度相对素土试样提高了 46.88%, 而 2% 掺量相对 1.5% 掺量只提高了 7.73%, 说明随着黄原胶掺量的大幅增加黏土样抗压强度的增幅减小。此外, 养护 4 d、黄原胶掺量 2% 的试样相对素土样有最高的抗压强度提升, 高达 76.59%。这说明养护

4 d 后, 高含量的黄原胶基质在黏土样抵抗变形破坏时起到重要作用。

从图 2 中还可以看出, 黄原胶掺量 0%、0.5%、1% 时的应力应变曲线形状都大致相同, 而 1.5%、2% 掺量曲线比较相似且区别于其他掺量曲线。弹性模量(割线模量)是应力应变曲线上一条直线的斜率, 本文取应变在 1%~2% 之间的直线来估算。当养护 0 d 时, 0%、0.5%、1% 掺量曲线的弹性模量

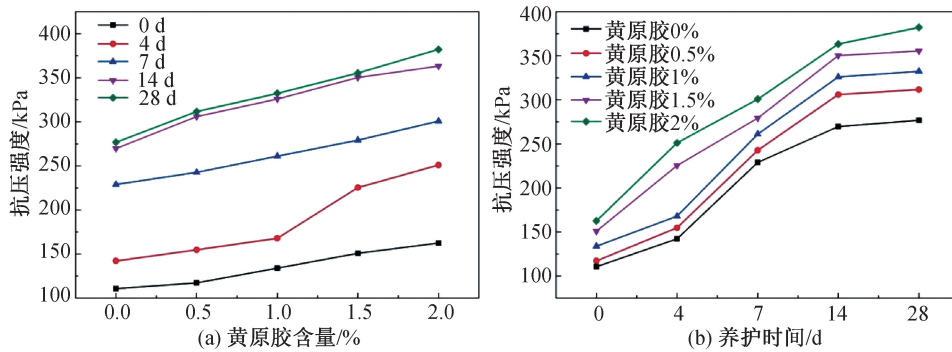


图3 黄原胶含量和养护时间对试样抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of xanthan gum content and curing time on compressive strength of samples

约为 2.8 MPa, 而 1.5%、2% 曲线的割线模量约为 5.5 MPa。这种黄原胶掺量越高, 弹性模量越大的现象, 说明经黄原胶改良后的黏土在轴向应变更小的情况下更快地达到峰值应力。Liu 等^[17]研究发现土样中的聚合物会在试样承受荷载时吸收能量, 较高聚合物含量处理过的土壤能够更快地达到峰值应力, 并快速抵消压缩应力, 而没有显著的变形。类似的试样中高含量的黄原胶基质为试样提供了更强的缓冲能力来承受载荷, 土中的黄原胶基质有较强的传递、吸收能量的能力, 使得试样受到轴向压力时产生的变形更小, 从而造成弹性模量的升高。养护 4 d、养护 7 d 同理, 而养护 14 d、养护 28 d 时则未产生这种现象, 说明养护 14 d 后黄原胶与土壤的反应基本完成。当黄原胶掺入土中时, 黄原胶单体并不是直接和土壤本身发生反应, 而是与细颗粒形成基质, 胶结在粗颗粒之间产生加固作用, 当黄原胶掺量过高时, 过剩的黄原胶会吸附水分, 形成高度粘滞的悬浮液, 填补土壤颗粒之间的空隙^[18], 随着养护时间增加, 水分和土颗粒、黄原胶之间的相互作用增强, 土样中的黄原胶基质由于水分的蒸发而硬化, 低掺量黄原胶也可以很好地加固土体, 因此没有了这种差异。

总体而言, 经黄原胶改良后的黏土在抗压强度方面有显著提高, 并且随着黄原胶掺量的增加试样的抗压强度也呈增长趋势, 这是因为随着土样中掺入的黄原胶含量增多, 土样中的黄原胶基质逐渐增大增厚, 黄原胶与土颗粒的相互作用增多, 使得土样整体性更好, 抗压强度更高。该作用表现为一个非线性的增长过程, 如图 3(a) 所示, 虽然整体上试样的抗压强度随着黄原胶掺量的增加呈上升趋势, 但是其中黄原胶掺量在 0.5%~1% 区间和 1%~1.5% 区间上抗压强度增幅较大, 尤其是养护 4 d、掺量 1%~1.5% 区间, 随着黄原胶掺量的

大幅增加土样的抗压强度将趋于平稳。

从图 3(b) 也可以看出, 随着养护时间的增加, 试样的抗压强度也在逐渐增强, 并且逐渐趋于稳定。其中 0%、0.5%、1% 掺量 (低掺量) 的土体和 1.5%、2% 掺量 (高掺量) 的土体又有区别。养护时间从 0 d 增加到 4 d 时, 低掺量土体抗压强度分别增加了 29.23%、32.25%、26.25%, 高掺量增加了 50.22%、54.96%; 养护时间从 4 d 增加到 7 d 时, 低掺量土体抗压强度分别增加了 61.04%、56.84%、55.44%, 高掺量增加了 23.91%、19.81%; 养护时间从 7 d 增加到 14 d 时, 高掺量与低掺量土体试样的抗压强度增幅相似且比素土样的增幅大; 当养护时间从 14 d 增加到 28 d 时, 高掺量、低掺量和素土样的增幅相同, 表现在图 3(b) 中即五条折线近似平行。这说明黄原胶对黏土样的加固反应主要发生在前 14 d, 且 0~4 d 内高掺量土体的增强幅度更大, 此时黄原胶基质在黏土样抵抗变形时起重要作用。随着养护时间增加到 7 d, 黄原胶与土颗粒的结合更紧密, 土样中的黄原胶基质由于水分的蒸发而硬化, 掺入低掺量黄原胶的土体也大幅增强; 由于高掺量的黄原胶保水性更强, 养护 7 d 时高掺量土体的增强幅度反而不如低掺量土体和素土样, 养护 14 d 后则都趋于稳定。考虑到材料成本和可加工性, 建议实际工程应用中采用掺量 1.5% 黄原胶进行土壤改良, 后续研究可以采用 14 d 的养护时间来设计试验方案。

2.2 破坏形态

土样的破坏形态与土颗粒之间的结构性变化、土的强度特性密切相关。试样在进行无侧限抗压强度试验时, 在外部荷载的作用下会有明显的剪切带形成, 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^[19]。

图 4 是在不同养护时间下黄原胶掺量 1.5%



图4 相同掺量不同养护时间试样破坏形态

Fig. 4 Failure morphology of samples with the same content and different curing time

的三种试样破坏形态。从图4(a)可以看到养护4 d的试样破坏形态较为完整,裂缝呈劈裂型,试样上半部分无明显剪切带,下半部分发生侧胀。从图4(b)、(c)可以看到养护时间14、28 d的试样破坏时沿剪切带有土块翘起,裂缝曲折交错,试样发生整体性破坏。这是因为随着养护时间的增加,黄原胶与黏土颗粒的反应更加充分,结合更加紧密,黄原胶基质的强度也大大增强,试样的弹性模量和抗压强度相应增强,因而能够承受更大的压力,产生更为曲折的裂纹。



图5 相同养护时间不同黄原胶掺量试样破坏形态

Fig. 5 Failure morphology of samples with different content in the same curing time

图5是养护28 d后不同黄原胶掺量的的三种土体试样轴向应变12%时的破坏形态,从图5(a)可以看出,素土样沿着一个剪切面发生脆性破坏,有明显的剪切带形成,破坏裂缝较为完整,贯通性好,试样直径没有太大变化,表面较为光滑。从图5(b)、(c)可以看出,添加黄原胶后的试样在压缩时发生了一定的侧胀,并且周身小裂缝增多,多条

锥形破坏裂缝起伏曲折。这说明黄原胶增强了土体颗粒之间的黏性,使得土体有更好的整体性,在进行无侧限抗压强度试验发生形变时有更好的抵抗变形的能力,延缓了土体的破坏,从而提升了抗压强度。

3 机理分析

土体在受力条件下产生的变形是土体结构、颗粒、孔隙等要素发生变形的综合结果,因此土体在受力试验中的表现与土体本身的内在结构有关。土体中每个土颗粒都处于内力和外力的共同作用下的平衡状态中,外力如荷载和重力等,内力作用包括土颗粒内部作用和土粒之间的相互作用,而土粒间的相互作用又包括化学键、分子键、离子静电力、毛细水压力等,这些因素影响着土体的物理化学性质^[20]。可以预见的是黄原胶改良后的黏土一定在微观结构上有着与宏观试验结果相对应的表现,因此本文采用扫描电子显微镜(SEM)从微观角度分析黄原胶改良黏土的机理。

图6是经黄原胶处理过的黏土试样的扫描电镜图像。从图6(a)可以看出,黄原胶基质填补了土颗粒之间的空隙,增加了土颗粒与土颗粒的接触面积;从图6(b)可以看出,黄原胶与水结合后形成高黏性的凝胶,在不直接接触的土颗粒之间建立了连接的桥梁;从图6(c)可以看出,黄原胶凝胶覆盖在土颗粒表面,增加了黏土颗粒之间的黏性。由于黏土颗粒带电,黄原胶单体可以通过黄原胶大分子自带的羧基(-COOH)和羟基(-OH)基团与黏土颗粒表面的阳离子之间发生的桥接反应和氢键作用直接结合到黏土颗粒上^[21],从而增强了土粒之间的联结力,也增强了土体在受力时抵抗外力作用而变形的能力。相关研究发现,经过黄原胶改良的黏土与未经任何处理的黏土相比,前者

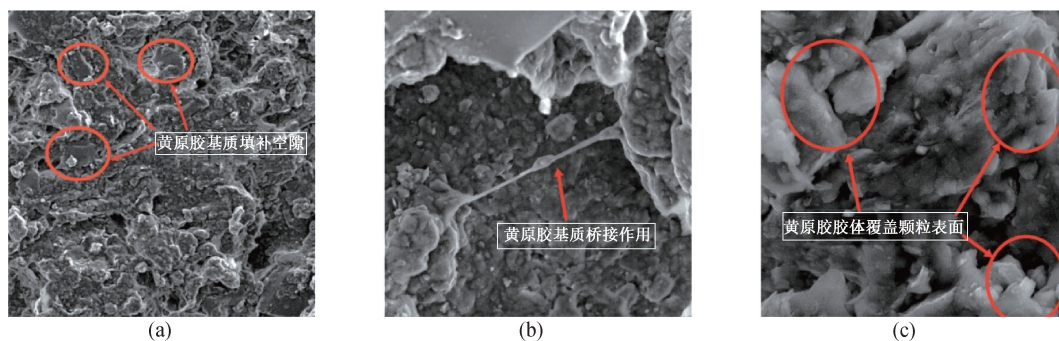


图6 试验试样的扫描电镜图像

Fig. 6 SEM images of the test samples

的粒度分析曲线有明显右移^[22],这说明黄原胶的掺入使得黏土颗粒粒径变大,土中发生了颗粒粘聚的现象,这与图6(c)观察到的粘粒聚集现象是一致的。因此黄原胶对黏土的加固机理可以解释为,黄原胶基质填补了黏土颗粒之间的空隙,覆盖在黏土颗粒表面,在不直接接触的颗粒之间进行桥接,从而增强颗粒间的相互作用力,增强试样的整体性。黄原胶基质的强度和黄原胶与黏土颗粒结合的特性,增强了黏土抵抗变形的能力,从而提升了抗压强度。

4 结论

1)黄原胶作为添加剂能够加固黏土提高黏土的无侧限抗压强度。随着黄原胶掺量的增加,改良后的黏土试样抗压强度也随之提高,这是一个非线性的增长过程,预计随着黄原胶掺量的大幅增加,土样的抗压强度将趋于平稳,黄原胶改良黏土的最适宜掺量是1.5%、最佳养护时间是14 d。

2)整体而言,随着养护时间的增加,黏土的抗压强度也会不断增加。养护0~7 d时1.5%、2%掺量的黏土弹性模量会高于其他土样,养护时间延长时这种现象消失;高掺量和低掺量土样在不同的养护时间其抗压强度的增强速度也不同。黄原胶与土体颗粒、水之间的大部分反应发生在前14 d内。

3)改良黏土在破坏时会有侧胀现象,通过分析扫描电镜图像发现,黄原胶填补了黏土颗粒之间的空隙,增加了直接接触的土颗粒之间的接触面积,在不直接接触的土颗粒之间搭建了桥梁,增强了黏土试样的整体性,从而增强土体抗压强度。土样的加固与黄原胶基质的强度和黄原胶与黏土颗粒的结合特性直接相关。

参考文献:

- [1] 刘辉,王俊杰,黄诗渊,等. 无侧限压缩下中心裂缝压实黏土强度及破坏特征分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(23): 9539-9545.
- [2] 罗鸿,黄诗渊,温辉波,等. 粘土材料单轴压缩及强度特性试验研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(05): 98-102.
- [3] RASHID A S A, LATIFI N, MEEHAN C L, et al. Sustainable Improvement of Tropical Residual Soil Using an Environmentally Friendly Additive[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(6): 2613-2623.
- [4] 樊恒辉,高建恩,吴普特. 土壤固化剂研究现状与展望[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2006(02): 141-146+152.
- [5] 杨楠,李艳霞,赵盟,等. 水泥熟料生产企业CO₂直接排放核算模型的建立[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(01): 79-87.
- [6] 包贞,冯银厂,焦荔,等. 杭州市大气PM_{2.5}和PM₁₀污染特征及来源解析[J]. 中国环境监测, 2010, 26(02): 44-48.
- [7] 贺成龙,吴建华,刘文莉. 水泥生态足迹计算方法[J]. 生态学报, 2009, 29(07): 3549-3558.
- [8] 武立林,钱卫,刘瑾,等. 剑麻纤维/砂土复合材料三轴剪切强度特性[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2020, 37(04): 26-33.
- [9] 冯巧,刘瑾,卢毅,等. 一种复合加固剂改良砂土的强度试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(04): 903-911.
- [10] 孙政. 生物酶改良粉质黏土的应力—应变特性试验研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2019.
- [11] ESTABRAGH A R, BEYTOLAHPOUR I, JAVADI A A. Effect of Resin on the Strength of Soil-Cement Mixture[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(7): 969-976.
- [12] 石宝忠. 黄原胶调研报告[J]. 化工科技市场, 2003(11): 23-24.
- [13] ZOHURIAAN M J, SHOKROLAHI F. Thermal Studies on Natural and Modified Gums[J]. Polymer Testing, 2003, 23(5): 575-579.
- [14] SILVIA Comba, RAJANDREA Sethi. Stabilization of Highly Concentrated Suspensions of Iron Nanoparticles Using SHEAR-THINNING Gels of Xanthan Gum[J]. Water Research, 2009, 43(15): 3717-3726.
- [15] JOHANN Plank. Applications of Biopolymers and Other Biotechnological Products in Building Materials[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2004, 66(1): 1-9.
- [16] ILHAN Chang, JOOYOUNG Im, AWLIA Kharis Prasadhi, et al. Effects of Xanthan Gum Biopolymer on Soil Strengthening[J]. Construction and Building Materials, 2015, 74: 65-72.
- [17] LIU Jin, CHEN Zhihao, ZENG Zhaojun, et al. Influence of Polyurethane Polymer on the Strength and Mechanical Behavior of Sand-root Composite[J]. Fibers and Polymers, 2020, 21(4): 829-839.
- [18] WHITCOMB P J, MACOSKO C W. Rheology of Xanthan Gum[J]. Journal of Rheology, 1978, 22(5): 493-505.
- [19] 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.
- [20] 卢廷浩. 土力学[M]. 南京:河海大学出版社, 2005.
- [21] NUGENT Rick A, ZHANG Guoping, ROBERT P. Gambrell. Effect of Exopolymers on the Liquid Limit of Clays and Its Engineering Implications[J]. Transportation Research Record, 2009, 2101(1): 34-43.
- [22] BARANI Omid Reza, BARFAR Pourya. Effect of Xanthan Gum Biopolymer on Fracture Properties of Clay[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(1): 1-12.

(责任编辑 王利君)