

DOI:10.11918/202208040

生物聚合物对高含水量淤泥压缩渗透特性的影响

邬文昊¹, 孙宏磊², 翁振奇²

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058; 2. 浙江工业大学 土木工程学院, 杭州 310014)

摘要: 生物聚合物可以有效改善土体的力学性质。为评估生物聚合物改性淤泥在实际工程中的应用前景, 研究黄原胶(XG)、海藻酸钠(SA)、阳离子瓜尔胶(GG)对高含水量淤泥压缩性和渗透性的影响。通过一维渗透固结试验, 探究生物聚合物种类及掺量对土体结构屈服应力、压缩指数、渗透系数等指标的影响。同时, 通过电镜扫描(SEM)和压汞试验(MIP), 分析生物聚合物改性高含水量淤泥的微观机制。结果表明, 生物聚合物改性淤泥中的黏土-聚合物网络结构使其压缩性降低。随着掺量的增加, 改性淤泥结构屈服应力增大, 压缩性减小。当竖向有效应力大于结构屈服应力时, 改性淤泥 C_c 显著增大, 且随着掺量的变大而提高。生物聚合物改性淤泥渗透性明显降低, 所用聚合物中XG的效果最显著, 在1.5%掺量时达到两个数量级。

关键词: 生物聚合物; 高含水量淤泥; 压缩性; 渗透性; 微观结构

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)06-0117-08

Effect of biopolymers on compressibility and permeability of high water-content sludge

WU Wenhao¹, SUN Honglei², WENG Zhenqi²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Biopolymers can effectively improve the mechanical properties of soil. In order to evaluate the application prospect of biopolymer-modified sludge in practical engineering, the effects of xanthan gum (XG), sodium alginate (SA), and cationic guar gum (GG) on the compressibility and permeability of high water-content sludge were studied. On the basis of one-dimensional osmotic consolidation test, the effects of different types and dosages of biopolymers on the yield stress, compression index, and coefficient of permeability of soil were investigated. Meanwhile, the microscopic mechanism of the modification of high water-content sludge by biopolymer was analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and mercury intrusion porosimetry (MIP) tests. Results show that the compressibility of modified sludge was reduced because of the formation of clay-polymer network structure. With increasing dosage, the compressibility of modified sludge decreased, while the structural yield stress increased gradually. When the vertical effective stress was greater than the structural yield stress, the C_c value of the modified sludge increased significantly, and it further increased with the increase in dosage. The permeability of the modified sludge was significantly reduced. Among the polymers used in the study, XG had the most significant effect, achieved two orders of magnitude when the dosage was 1.5%.

Keywords: biopolymer; high water-content sludge; compressibility; permeability; microstructure

滨海地区存在大量淤泥质土, 存在含水量高、强度低等特点^[1]。目前, 常用水泥、石灰等改善高含水量淤泥的工程特性^[2-3], 但是在水泥生产以及淤泥处理过程中存在环境污染、资源消耗大等诸多问题^[4-5]。因此, 有学者尝试采用绿色环保的新型材料来改良高含水量淤泥^[6-9]。

生物聚合物是由生物体如藻类、真菌或细菌产

生的可降解多糖聚合物^[10]。近年来, 一些研究者对生物聚合物在岩土工程领域的应用进行了探究。Dehghan 等^[11]用黄原胶和瓜尔胶处理含水量为14%的湿陷性土, 结果表明, 生物聚合物改善了力学性能并降低了湿陷性土的最大干密度和渗透性。Soldo 等^[12]研究了黄原胶、 β -1,3/1,6 葡聚糖、瓜尔胶、壳聚糖和海藻酸盐5种生物聚合物对含水量

收稿日期: 2022-08-11; 录用日期: 2022-10-02; 网络首发日期: 2022-10-31

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20221028.1422.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(52078464)

作者简介: 邬文昊(1998—), 男, 硕士研究生; 孙宏磊(1981—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 翁振奇, 1111802026@zjut.edu.cn

为 16.5% 的粉土强度的影响,研究表明,生物聚合物处理过的粉土具有更高的强度,并且在大气条件下具有更强的干湿耐久性。Latifi 等^[13]用黄原胶处理了含水量为 38% 的膨润土和 19.5% 的高岭石,并以强度和压缩性为标准得到其最优掺量分别为 1% 和 1.5%。Chang 等^[14]通过室内试验研究了结冷胶对含水量低于 65% 的砂质黏土的加固性能的影响,发现结冷胶强化土体力学性能的原因主要是引起细颗粒的聚集以及细颗粒与粗颗粒的连接。Bozyigit 等^[15]用黄原胶和瓜尔胶处理含水量 40% 以下的高岭土,结果表明,在含水量为 25%、掺量为 2% 时土样无侧限抗压强度最大。与纯黏土相比,添加黄原胶的土样强度提高了 5.23 倍,添加瓜尔胶的土样强度提高了 8.53 倍。上述研究表明,生物聚合物作为一种环境友好型材料可以有效改善土体的力学性质。为了评估生物聚合物改性淤泥在实际工程中的应用前景,需要对生物聚合物对高含水量淤泥压缩性和渗透性影响做深入研究,且目前国内外关于这方面的研究较少。

鉴于此,采用一维固结渗透试验研究了黄原胶、海藻酸钠和阳离子瓜尔胶处理的高含水量淤泥压缩指数、结构屈服应力、渗透系数等参数随掺量的变化规律,采用扫描电镜 (SEM) 试验和压汞 (MIP) 试验分析了改性淤泥微观孔隙特征与孔隙分布规律,并从生物聚合物和黏土颗粒间相互作用的角度,揭示生物聚合物对高含水量淤泥压缩特性和渗透特性影响的内在机制。

1 试 验

1.1 试验材料

黄原胶是由 D-葡萄糖、D-甘露糖、D-葡萄糖醛酸组成的多糖类高分子化合物^[16]。海藻酸钠是由 1,4 聚-β-D-甘露糖醛酸和 α-L-古罗糖醛酸组成的一种线型聚合物^[17]。阳离子瓜尔胶是对瓜尔胶进行氨基化阳离子改性得到的一种水溶性高分子,其化学名称为瓜尔胶羟丙基三甲基氯化铵^[18]。

试验淤泥取自浙江省台州市某软土地基处理现场,取样位置为海平面高度以下 2.40 m 的吹填淤泥层。土样的基本物理性质如表 1 所示。土体比重采用比重瓶法进行测定,土体液塑限采用液塑限联合测定仪进行测量。通过密度计法获得的颗粒级配如图 1 所示,土中黏粒 (<5 μm)、粉粒(5~75 μm)和砂粒 (>75 μm~2 mm)的质量分数分别为 13.1%、55.6% 和 31.3%,根据美国材料试验协会 ASTM D2487-17 标准,判断该土样属于低塑性粉质黏土。

表 1 试验用淤泥物理性质指标

Tab. 1 Physical properties of sludge

初始含水量	相对密度	液限	塑限	塑性指数
$w/\%$	G_s	$w_L/\%$	$w_P/\%$	I_P
122	2.673	40	27	13

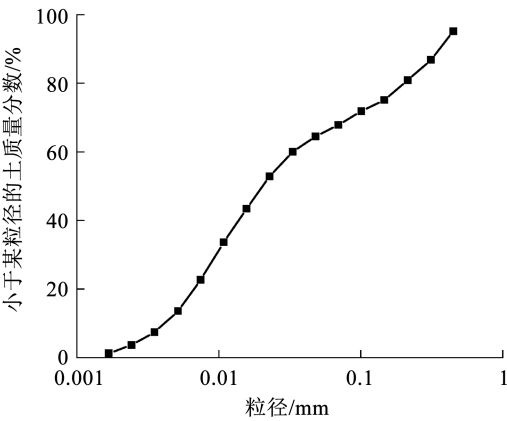


图 1 试验用淤泥颗粒级配

Fig. 1 Gradation curves of sludge

1.2 试验方案与方法

试验用土样初始含水量设计为 80%,即两倍液限。结合已有研究^[19],采用 0.5%、1%、1.5% (质量分数) 3 种掺量,掺量定义为生物聚合物的质量与干土质量之比。

试验开始前先将淤泥烘干,再用碎土机粉碎并过孔径为 2 mm 的筛子。称取一定质量的干土,根据设计掺量将生物聚合物与干土拌合均匀,加入去离子水并搅拌使其充分混合。混合后的土样在 (20±2)℃ 的恒温条件下养护 24 h,此时胶结反应已基本充分^[20]。将养护完成的土样装入直径 61.8 mm、高度 40 mm 的环刀内,作为固结渗透试验的试样。

标准固结装置设计的初始压力一般为 12.5 kPa。试验所用高含水量淤泥强度低,难以承受如此高的初始压力,因此,本试验采用 Hong 等^[21]提出的超低压一维渗透固结仪,如图 2 所示。固结试验的加载等级为 1、2、3、4、6、8、10、12.5、25、50、100、200、300、400 和 800 kPa 共 15 个荷载水平。稳定标准为每级荷载下固结 24 h 或试样每小时变形量不大于 0.01 mm^[22]。在每一级加载完成后进行渗透试验。考虑到在竖向有效应力很小(1~4 kPa)时试样所能承受的渗透压力过小,当竖向有效应力达到 6 kPa 后再进行渗透试验。为了避免渗透压力过小而导致的试验误差,渗透试验在不同的荷载水平下采用了不同的初始水头。当竖向有效应力小于 12.5 kPa 时,采用 0.5 m 的渗透水头;竖向有效应力在 12.5~200 kPa 时,采用 1.0 m 的渗透水头;竖向有效应力大于 200 kPa 时,采用 2.0 m 的渗透水头^[23]。完成

固结渗透试验后选取代表性土样进行 SEM 和 MIP 试验。

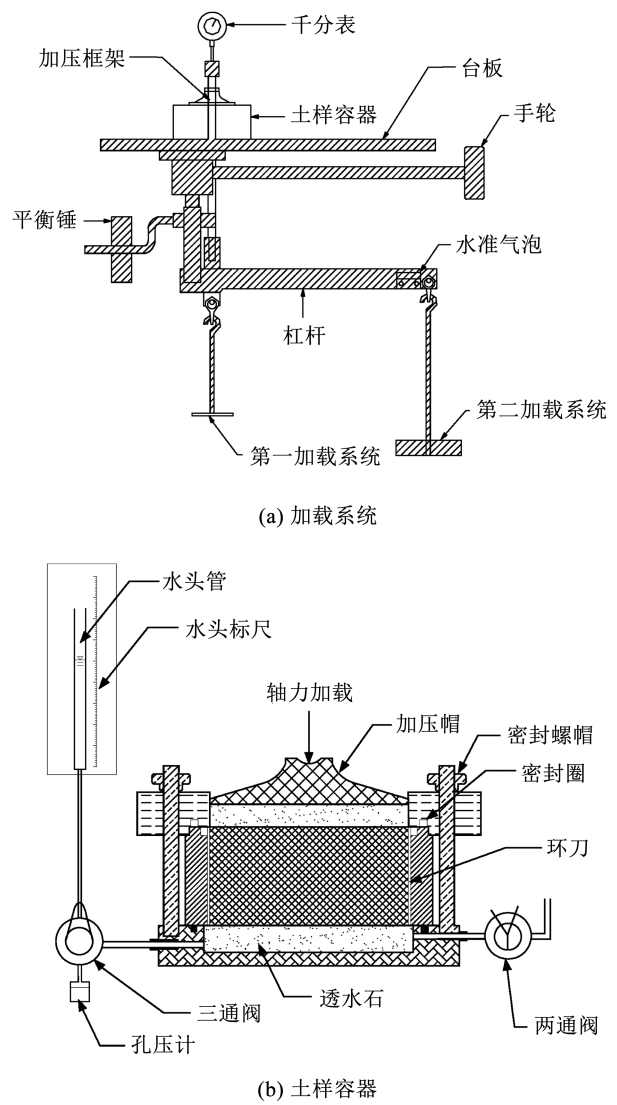


图2 一维渗透固结仪示意

Fig. 2 Schematic of one-dimensional osmotic consolidation instrument

2 试验结果与分析

2.1 一维固结渗透试验结果

采用 Butterfield^[24] 提出的双对数法,通过土体孔隙比与竖向荷载 p 之间的关系($\ln(1+e) - \log p$) 确定改性淤泥的结构屈服应力,结果见表2。图3为不同掺量下生物聚合物改性淤泥双对数压缩曲线。从图3及表2可以看出,生物聚合物的掺入提高了高含水量淤泥的结构屈服应力。当掺量为1.5%时,黄原胶改性淤泥、海藻酸钠改性淤泥和阳离子瓜尔胶改性淤泥的结构屈服应力分别达到了11.20、6.31和6.89 kPa,相比重塑淤泥的2.01 kPa提高了457%、214%和243%。同时,随着掺量的增加,生物聚合物改性淤泥的液限提高,含水比降低,结构屈服应力也逐渐增

大。当聚合物掺量从0.5%提高到1.5%时,黄原胶改性淤泥、海藻酸钠改性淤泥和阳离子瓜尔胶改性淤泥的结构屈服应力分别提高了113% (由5.30 kPa提高至11.20 kPa)、129% (由2.76 kPa提高至6.31 kPa) 和213% (由2.20 kPa提高至6.89 kPa)。综上可知,生物聚合物的掺入可以增强高含水量淤泥的结构性,3种聚合物中黄原胶的效果最显著。

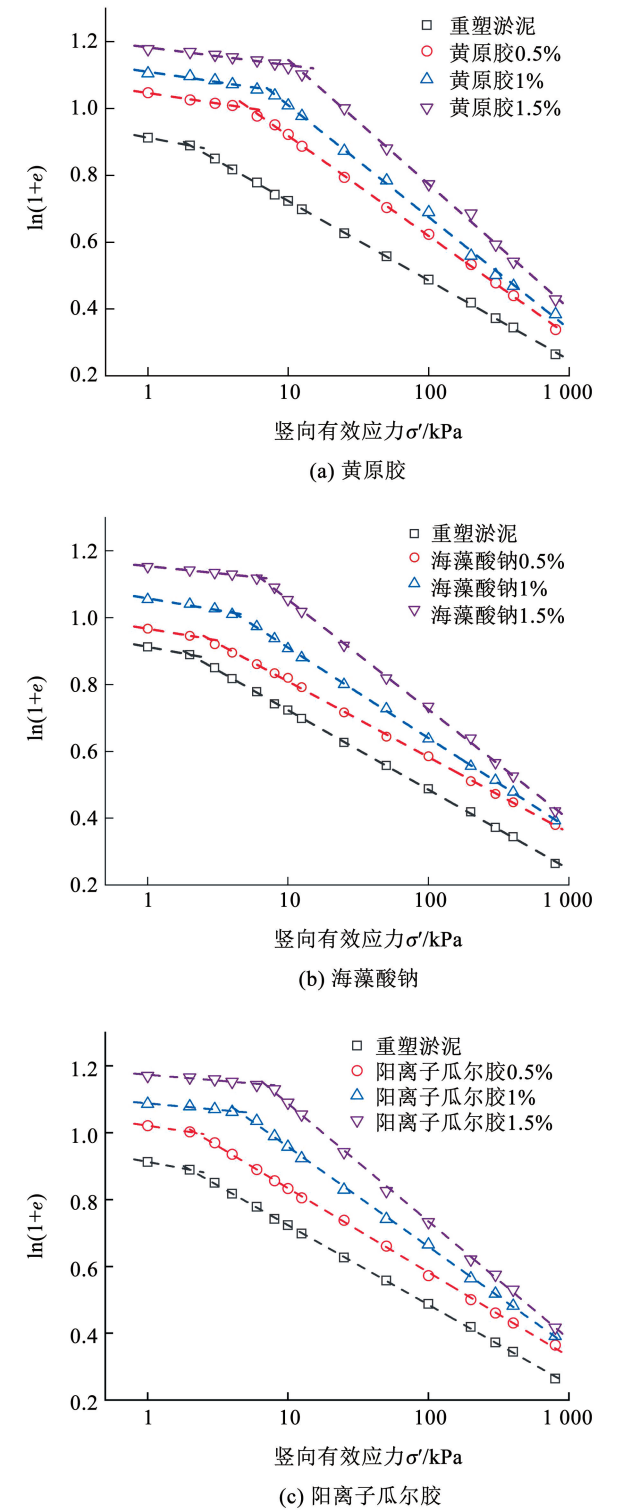


图3 生物聚合物改性淤泥双对数压缩曲线

Fig. 3 Double-log compression curves of biopolymer-modified sludge

表 2 生物聚合物改性淤泥结构屈服应力

Tab.2 Structural yield stress of biopolymer-modified sludge

掺量/%	结构屈服应力/kPa		
	黄原胶	海藻酸钠	阳离子瓜尔胶
0	2.01	2.01	2.01
0.5	5.30	2.76	2.20
1.0	7.23	4.15	4.46
1.5	11.20	6.31	6.89

图 4 为不同生物聚合物及其掺量对改性淤泥压缩指数的影响。 C_s 和 C_c 分别表示竖向有效应力小于结构屈服应力和竖向有效应力大于结构屈服应力时改性淤泥的压缩指数。可以看出,各组改性淤泥的 C_s 均小于重塑淤泥,且随着掺量的增加,各组 C_s 均呈减小的趋势。重塑淤泥的 C_s 为 0.306,而 1.5% 掺量黄原胶改性淤泥、海藻酸钠改性淤泥和阳离子瓜尔胶改性淤泥的 C_s 分别为 0.126、0.134 和 0.137,降低了 59%、56% 和 55%。3 种生物聚合物都能减小改性淤泥的压缩性,其中黄原胶的降低效果最明显。

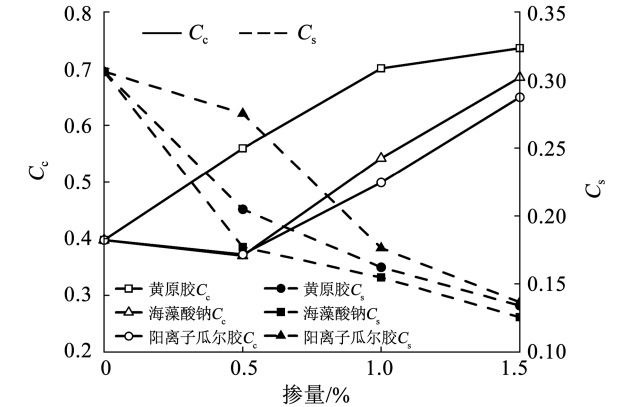


图 4 生物聚合物改性淤泥压缩指数

Fig. 4 Compression index of biopolymer-modified sludge

当竖向有效应力高于结构屈服应力后,土样压缩性显著增大。各掺量下黄原胶改性淤泥 C_c 都大于重塑淤泥的 C_c ,且黄原胶改性淤泥的 C_c 随着黄原胶掺量的提高而增加。0.5% 海藻酸钠改性淤泥和 0.5% 阳离子瓜尔胶改性淤泥的 C_c 都比重塑淤泥小,当掺量进一步增加达到 1% 和 1.5% 时,两者的 C_c 都有明显增加,且都高于重塑淤泥。综上,当竖向有效应力高于结构屈服应力后,高掺量的生物聚合物会导致改性淤泥的压缩性提高。

图 5 为生物聚合物改性淤泥 e - $\log k$ 渗透曲线。可以看出,重塑淤泥和生物聚合物改性淤泥的孔隙比与渗透系数均大致呈线性关系,且土样的渗透系数随孔隙比的增大而增大。在相同孔隙比的情况下,生物聚合物改性淤泥的渗透性明显低于重塑淤泥。随着掺量的提高,生物聚合物改性淤泥的渗透

性进一步降低。3 种改性淤泥中黄原胶改性淤泥的渗透性降低幅度最大,在 1.5% 掺量时与重塑淤泥相比降低了两个数量级。海藻酸钠改性淤泥和阳离子瓜尔胶改性淤泥的渗透系数降低幅度接近,在 1.5% 掺量时与重塑淤泥相比降低了 1 个数量级。

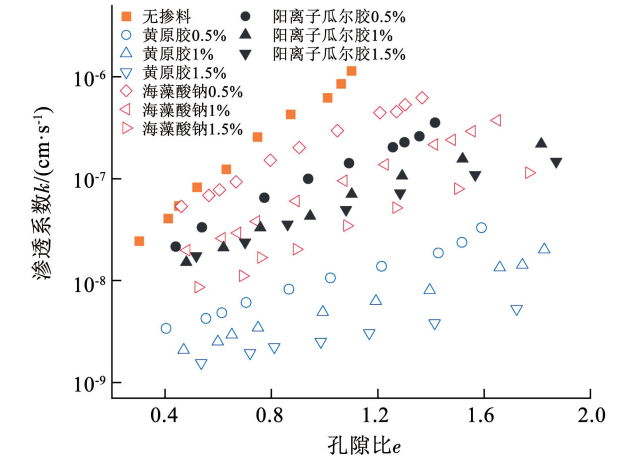


图 5 生物聚合物改性淤泥 e - $\log k$ 关系

Fig. 5 Relationship between e and $\log k$ of biopolymer-modified sludge

2.2 微观试验

图 6、7 分别为生物聚合物改性淤泥的累计进汞曲线和孔隙密度分布曲线。图 7 纵坐标 V (mL/g) 代表孔容, D (μm) 代表直径。图 8 为重塑淤泥以及掺量为 1.5% 时生物聚合物改性淤泥在放大倍数为 5 000 时的 SEM 图像。由图 7 可知,生物聚合物改性淤泥孔隙密度分布曲线呈单峰与主峰 + 次峰两种形式,主要孔径分布范围为 0.01 ~ 1 μm 。

由图 6(a) 可知,随着黄原胶掺量的提高,改性淤泥内部总孔隙体积降低。掺量为 0.5%、1% 和 1.5% 时对应的总累计进汞量分别为 0.175、0.166 和 0.157 mL/g,相比重塑淤泥的 0.217 mL/g 降低了 19.4%、23.5% 和 27.6%。由图 7(a) 可知,重塑淤泥孔隙密度分布曲线呈单峰形式,对应孔径为 0.435 μm 。在黄原胶掺量为 0.5% 时的孔隙密度分布曲线呈主峰 + 次峰形式,主峰对应孔径为 0.192 μm ,次峰对应孔径为 0.104 μm 。当掺量提高到 1% 和 1.5% 时,孔隙密度分布曲线呈现单峰形式,其对应孔径分别为 0.107 和 0.096 μm 。随着黄原胶掺量的提高,改性淤泥内部孔隙直径减小。结合图 8(a)、(b) 可知,加入黄原胶后,已经基本没有松散的片状黏土颗粒,取而代之的是黄原胶凝胶与黏土颗粒通过包裹和胶结作用形成的黄原胶 - 黏土基质。这种凝胶产物使得颗粒与颗粒间连接紧密形成整体,并填充了颗粒间的大孔隙,使得大孔隙数量逐渐减少,小孔隙数量逐渐增多。黄原胶 - 黏土基质降低了改性淤泥的总孔隙体积,导致改性淤泥渗透性降低。

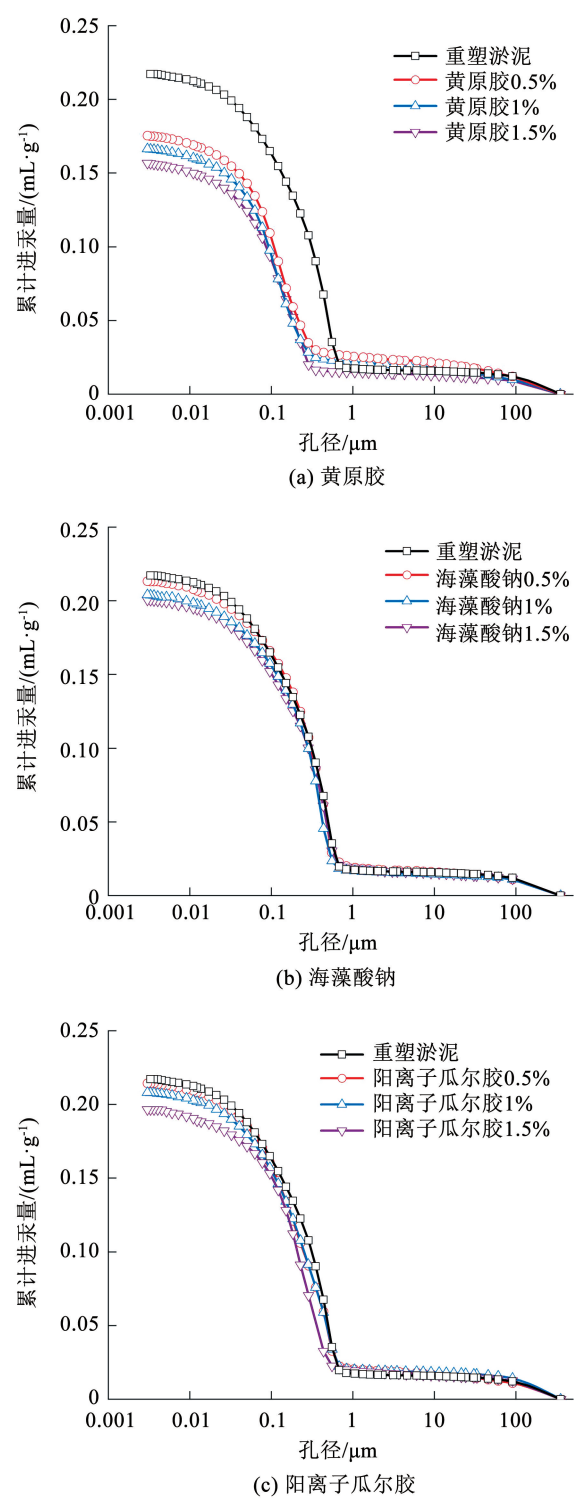


图 6 生物聚合物改性淤泥累计进汞曲线

Fig. 6 Mercury accumulation curves of biopolymer-modified sludge

由图 6(b)、(c) 可知, 海藻酸钠和阳离子瓜尔胶的掺入使得改性淤泥总孔隙体积降低。1.5% 掺量对应的海藻酸钠改性淤泥和阳离子瓜尔胶改性淤泥总累计进汞量分别为 0.200 和 0.196 mL/g, 相比重塑淤泥降低了 7.8% 和 9.7%。由图 7(b)、(c) 可知, 海藻酸钠改性淤泥的孔隙密度分布曲线均呈单

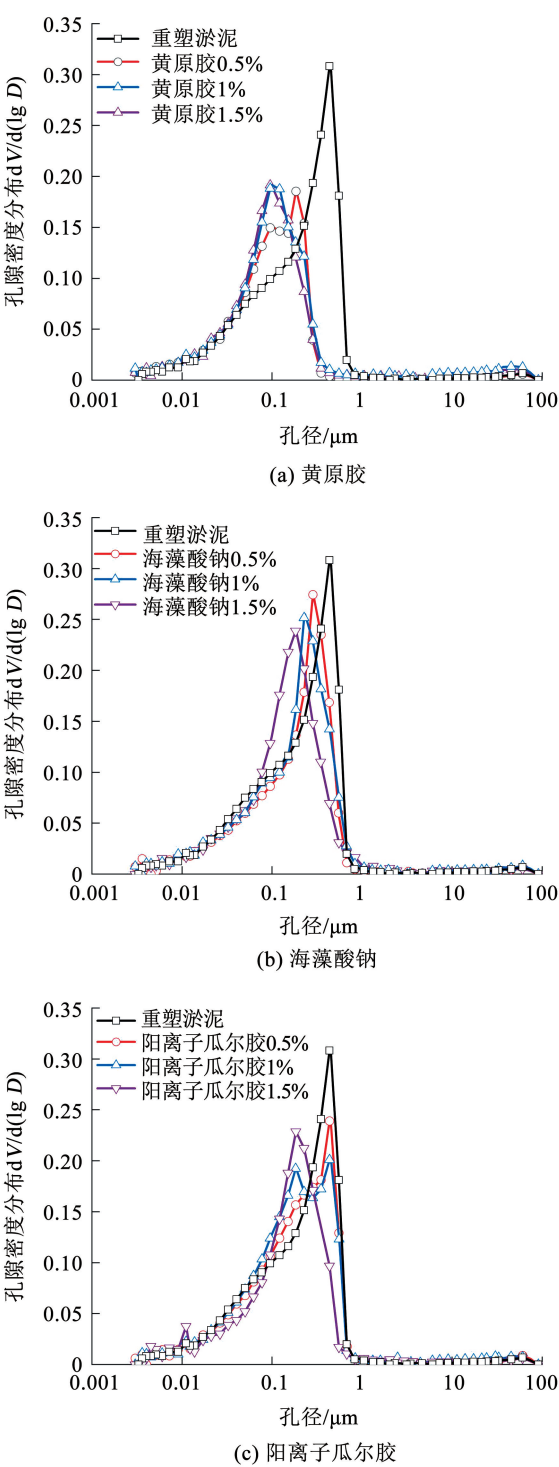


图 7 生物聚合物改性淤泥孔隙密度分布曲线

Fig. 7 Pore density distribution curves of biopolymer-modified sludge

峰形式, 掺量为 0.5%、1% 和 1.5% 时曲线峰值对应的孔径分别为 0.284、0.240 和 0.181 μm, 即随着掺量的增加, 孔隙密度分布曲线峰值对应的孔径逐渐减小。由图 8(c) 可知, 当加入海藻酸钠后, 部分细小片状的黏土颗粒仍依稀可见, 较大的黏土颗粒表面包裹有较厚的水凝胶, 并且能观察到大块的黏聚

体。由此可知,前述孔隙变化是因为海藻酸钠水凝胶让黏土颗粒形成凝块,进而造成孔隙直径减小、总孔隙体积降低。0.5% 和 1% 掺量的阳离子瓜尔胶的孔隙密度分布曲线呈单峰 + 次峰形式,主峰峰值对应孔径分别为 0.434 和 0.433 μm ,次峰峰值对应孔径分别为 0.276 和 0.185 μm 。1.5% 掺量时曲线为单峰形式,峰值对应孔径为 0.184 μm 。对比可知,随着掺量的提高,阳离子瓜尔胶改性淤泥内部小孔隙数量增加,大孔隙数量减少,导致改性淤泥总孔隙体积的降低。观察图 8(d) 阳离子瓜尔胶改性淤泥可知,原本分散的细小片状黏土颗粒胶结在了一起,较大的黏土颗粒外的水凝胶包裹层明显。阳离子瓜尔胶使细小的片状黏土颗粒形成了聚集体填充大孔隙,减小了总孔隙体积。

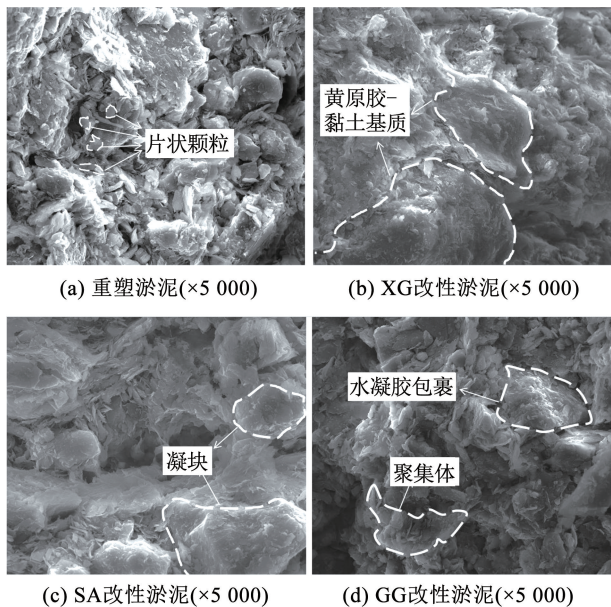


图 8 生物聚合物改性淤泥 SEM 图像

Fig. 8 SEM photographs of biopolymer-modified sludge

2.3 机制分析

当在淤泥中加入生物聚合物后,黄原胶、海藻酸钠和阳离子瓜尔胶会附着在黏土颗粒上,与黏土颗粒表面之间形成氢键^[25]。Podsiadlo 等^[26]研究表明,有机聚合物和黏土颗粒之间的氢键可以形成黏土-聚合物网络,提高整个系统的刚度。因此,改性淤泥的压缩性降低。然而竖向有效应力大于结构屈服应力后,黏土-聚合物网络被逐渐破坏,其对土体刚度的提高作用逐渐减弱。随着掺量的增加,大量水凝胶包裹土颗粒,使得土颗粒与土颗粒之间的接触变为土颗粒与凝胶、凝胶与凝胶之间的接触。水凝胶对土样孔隙刚度的贡献微乎其微,这导致了当竖向有效应力大于结构屈服应力后生物聚合物改性淤泥压缩指数显著提高, C_c 随着掺量的提高而进一

步增大。此外,SEM 试验结果表明,相同掺量下黄原胶水化产生的水凝胶量高于海藻酸钠和阳离子瓜尔胶,这使得在 0.5% 掺量时黄原胶改性淤泥的压缩性就已经大于重塑淤泥。

生物聚合物能够增强淤泥的结构性,一方面是由于黏性水凝胶的胶结作用,另一方面是通过离子键或氢键引起了颗粒聚集^[27]。黄原胶分子链上的羟基和羧基水解使其带有较多的负电荷,且黄原胶水凝胶的黏性是 3 种生物聚合物中最高的,这使得黄原胶改性淤泥同样掺量下表现出更强的结构性。海藻酸钠具有的羟基和羧基水解产生的负电荷较少,且其水溶胶在浓度低时黏度较低,因此,在 0.5% 掺量时海藻酸钠改性淤泥的结构屈服应力提高不明显。阳离子瓜尔胶带有水解产生正电荷的氨基,与海藻酸钠改性淤泥类似,在浓度较低时通过离子键只有有限的颗粒聚集,结构性不明显。当掺量提高时两种聚合物水溶胶黏度增加,同时引起更多的颗粒聚集,使得改性淤泥的结构屈服应力随着掺量的提高而快速增大。

生物聚合物改性淤泥渗透系数的降低可以归因于生物聚合物的堵塞作用。根据 Kozeny-Carman 及其修正方程,多孔介质的渗透系数与土体平均孔径呈正相关,与土颗粒比表面积和孔隙流体黏滞系数呈负相关^[28]。图 9 为改性淤泥渗透系数与平均孔径、比表面积的关系。可以看出,生物聚合物使改性淤泥的平均孔径减小,比表面积增大。以黄原胶为例,平均孔径降低了 50%,而比表面积仅提高了约 25%,同时,Cabalar 等^[29]的研究表明,生物聚合物的掺入对孔隙流体的黏滞系数影响不大。因此,平均孔径的变化是影响生物聚合物改性淤泥渗透系数变化的主要因素,比表面积的变化则是次要因素。生物聚合物与水结合形成黏性水凝胶包裹土颗粒,水凝胶在黏土颗粒间交联形成胶结聚合物,土中的孔隙被填充导致土样渗透性变差。相比另外两种生物聚合物,黄原胶具有较高的黏性,有助于颗粒的结合聚集。同时,在相同掺量下能产生更多的水凝胶以及黄原胶-黏土基质填充堵塞孔隙。由压汞试验的结果可知,相同掺量下黄原胶改性淤泥的总孔隙体积以及孔隙密度分布曲线峰值对应的孔径均明显低于其他两种改性淤泥,供水通过的连通孔隙是 3 种改性淤泥中最少的,因此,可以更大程度地降低改性淤泥的渗透系数。鉴于此,生物聚合物改性淤泥在浅层边坡稳定、堤岸防护等工程中有较大的应用潜力。

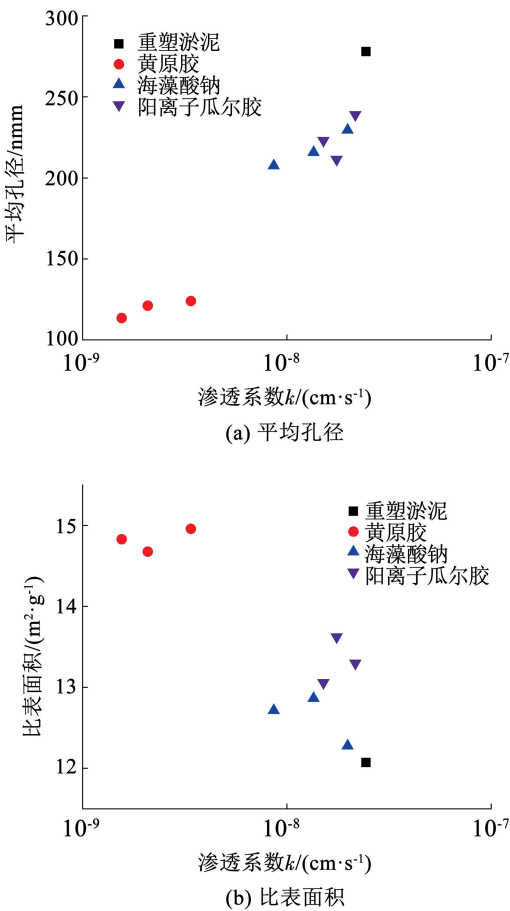


图 9 改性淤泥渗透系数与平均孔径、比表面积的关系

Fig. 9 Relationship between permeability coefficient, average pore size, and specific surface area

3 结 论

1)生物聚合物与黏土颗粒之间形成的黏土 - 聚合物网络结构降低了淤泥的压缩性,试验所用聚合物中黄原胶的效果最显著。随着掺量的增加,生物聚合物改性淤泥的结构屈服应力增大,压缩性降低。

2)当竖向有效应力大于结构屈服应力后,改性淤泥的压缩指数明显增大。随着掺量的增加改性淤泥 C_c 进一步变大,当掺量超过一定阈值(黄原胶 0.5%,海藻酸钠和阳离子瓜尔胶 1%)后改性淤泥 C_c 高于重塑淤泥。

3)生物聚合物对土体孔隙的堵塞作用导致淤泥的渗透性明显降低。改性淤泥的渗透系数随着生物聚合物掺量的提高而降低,其中,黄原胶对土体渗透性降低效果最明显,在 1.5% 掺量时达到两个数量级。

4)生物聚合物改性淤泥主要孔径分布为 0.01 ~ 1 μm。相比重塑淤泥,改性淤泥的孔隙直径变小,总孔隙体积减小,且随着掺量的提高进一步降低。

参考文献

[1]蔡袁强,周岳富,王鹏,等. 考虑淤堵效应的疏浚淤泥真空固结沉降计算[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 1
CAI Yuanqiang, ZHOU Yuefu, WANG Peng, et al. Calculation on settlement of dredged slurry treated by vacuum preloading method with consideration of clogging effects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 1. DOI: 10.16285/j. rsm. 2020. 0262

[2]汤怡新,刘汉龙,朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549
TANG Yixin, LIU Hanlong, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 549. DOI: 10.3321/j. issn:1000-4548. 2000. 05. 008

[3]朱伟,张春雷,高玉峰,等. 海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(10): 1561
ZHU Wei, ZHANG Chunlei, GAO Yufeng, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(10): 1561. DOI: 10.3785/j. issn. 1008-973X. 2005. 10. 023

[4]CHANG I, IM J, CHO G C, et al. Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering[J]. Sustainability, 2016, 8(3): 251. DOI: 10.3390/su8030251

[5]DASH S K, HUSSAIN M. Lime stabilization of soils: reappraisal [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(6): 707. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000431

[6]刘松玉,周建,章定文,等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 93
LIU Songyu, ZHOU Jian, ZHANG Dingwen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 93. DOI: 10.15951/j. tmge. 2020. 04. 009

[7]王宏伟,王东星,贺扬. MgO 改性淤泥固化土压缩特性试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(8): 2133
WANG Hongwei, WANG Dongxing, HE Yang. Experimental study on compressibility behavior of solidified dredged sludge with reactive MgO [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(8): 2133. DOI: 10.11817/j. issn. 1672-7207. 2017. 08. 022

[8]丁建文,张帅,洪振舜,等. 水泥 - 磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2817
DING Jianwen, ZHANG Shuai, HONG Zhenshun, et al. Experimental study of solidification of dredged clays with high water content by adding cement and phosphogypsum synchronously [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2817. DOI: 10.16285/j. rsm. 2010. 09. 025

[9]CHAN C M, MIZUTANI T, KIKUCHI Y. Reusing dredged marine clay by solidification with steel slag: a study of compressive strength [J]. International Journal of Civil and Structural Engineering, 2011, 2(1): 270

[10]CHANG I, PRASIDHI A K, IM J, et al. Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers [J]. Construction and Building Materials, 2015, 77: 430. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2014. 12. 116

[11]DEHGHAN H, TABARSA A, LATIFI N, et al. Use of xanthan and guar gums in soil strengthening [J]. Clean Technologies and

- Environmental Policy, 2019, 21(1): 155. DOI: 10.1007/s10098-018-1625-0
- [12] SOLDI A, MILETIC M, AUAD M L. Biopolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 267. DOI: 10.1038/s41598-019-57135-x
- [13] LATIFI N, HORPIBULSUK S, MEEHAN C L, et al. Improvement of problematic soils with biopolymer: an environmentally friendly soil stabilizer[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 29(2): 04016204. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001706
- [14] CHANG I, CHO G C. Shear strength behavior and parameters of microbial gellan gum-treated soils: from sand to clay[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(2): 361. DOI: 10.1007/S11440-018-0641-X
- [15] BOZYIGIT I, JAVADI A, ALTUN S. Strength properties of xanthan gum and guar gum treated kaolin at different water contents[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(5): 1160. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.06.007
- [16] 聂凌鸿, 周如金, 宁正祥. 黄原胶的特性、发展现状、生产及其应用[J]. 中国食品添加剂, 2003(3): 82
NIE Linghong, ZHOU Rujin, NING Zhengxiang. Focus on xanthan gum[J]. China Food Additives, 2003(3): 82 DOI: 10.3969/j.issn.1006-2513.2003.03.024
- [17] 王孝华. 海藻酸钠的提取及应用[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2007, 21(5): 124
WANG Xiaohua. Extraction and application of sodium alginate[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 21(5): 124. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425-B.2007.05.032
- [18] 申迎华, 王斌, 王志忠. 有机高分子絮凝剂在污泥脱水中的应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(5): 55
SHEN Yinghua, WANG Bin, WANG Zhizhong. Recent development on the organic high molecular weight flocculant for dewatering sludge[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2004, 20(5): 55. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2004.05.013
- [19] 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. DOI: 10.1007/s10706-017-0265-1
- [20] SINGH S P, DAS R. Geo-engineering properties of expansive soil treated with xanthan gum biopolymer[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2020, 15(2): 107. DOI: 10.1080/17486025.2019.1632495
- [21] HONG Z S, YIN Jie, CUI Y J. Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents[J]. Géotechnique, 2010, 60(9): 691. DOI: 10.1680/geot.09.P.059
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准; GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method; GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019
- [23] ZENG Lingling, HONG Zhenshun, CAI Yuanqiang, et al. Change of hydraulic conductivity during compression of undisturbed and remolded clays[J]. Applied Clay Science, 2011, 51(1/2): 86. DOI: 10.1016/j.clay.2010.11.005
- [24] BUTTERFIELD R. Discussion: a natural compression law for soils (an advance on e -log p')[J]. Géotechnique, 1981, 31(4): 563. DOI: 10.1680/geot.1981.31.4.563
- [25] MA X D, PAWLIK M. Role of background ions in guar gum adsorption on oxide minerals and kaolinite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, 313(2): 440. DOI: 10.1016/j.jcis.2007.04.075
- [26] PODSIADLO P, KAUSHIK A K, ARRUDA E M, et al. Ultrastrong and stiff layered polymer nanocomposites[J]. Science, 2007, 318(5847): 80. DOI: 10.1126/science.1143176
- [27] CHENG Zhanbo, GENG Xueyu. Soil consistency and interparticle characteristics of various biopolymer types stabilization of clay[J]. Geomechanics and Engineering, 2021, 27(2): 103. DOI: 10.12989/gae.2021.27.2.103
- [28] 刘海伟, 党发宁, 田威, 等. 修正 Kozeny-Carman 方程预估黏土渗透系数的研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊1): 186
LIU Haiwei, DANG Faning, TIAN Wei, et al. Prediction of permeability of clay by modified Kozeny-Carman equation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(Sup.1): 186. DOI: 10.11779/CJGE2021S1034
- [29] CABALAR A F, AWRAHEEM M H, KHALAF M M. Geotechnical properties of a low-plasticity clay with biopolymer[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(8): 04018170. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002380

(编辑 刘 彤)