

黄原胶和棕榈丝纤维对上海黏土抗压强度的影响

曹智民, 璩继立

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要:为改良上海黏土强度低、易变形的工程特性,将黄原胶和棕榈丝纤维以不同质量加筋率加入上海黏土并在不同养护龄期下养护,通过无侧限抗压强度试验探究黄原胶和棕榈丝纤维对上海黏土抗压强度的影响。试验结果表明:与素土相比,黄原胶能够提高土体抗压强度,但也增加了土体的脆性;棕榈丝纤维能提高土体抗压强度,也能提高土体的延性;同时添加黄原胶和棕榈丝纤维,土体的抗压强度和延性均有明显提高;抗压强度最适宜加筋率为1.5%黄原胶和0.75%棕榈丝纤维。

关键词:上海黏土;黄原胶;棕榈丝纤维;养护龄期;抗压强度;应力-应变

中图分类号:TU43 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-643X(2019)05-0209-06

Effect of xanthan gum and palm silk fiber on compressive strength of Shanghai clay

CAO Zhimin, QU Jili

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to improve the low strength and easy deformation engineering properties of Shanghai clay, xanthan gum and palm silk fiber were added at different mass reinforcement ratios and cured the clay under different curing ages. Through unconfined compressive strength test, we investigated the impacts of xanthan gum and palm silk fiber on compressive strength of Shanghai clay. The results indicated that compared with plain soil, xanthan gum can improve the compressive strength of soil, but also increase the brittleness of soil; palm fiber can improve the compressive strength of soil and improve the ductility of soil. Adding both xanthan gum and palm silk fiber, the compressive strength and ductility of the soil obviously improved. The most suitable reinforcement ratio for compressive strength of soil is 1.5% xanthan gum and 0.75% palm silk fiber.

Key words: Shanghai clay; xanthan gum; palm silk fiber; curing period; compressive strength; stress-strain

1 研究背景

上海地区的土质属于较为典型的天然软黏土,严学新等^[1]调查发现,上海地区埋深75 m内主要以黏性土层为主,黏土有着含水率高、强度低、孔隙比大、压缩性高等不良工程性质,而且还具有明显的流变性和触变性等不良特点^[2]。上海的高层建筑、地铁隧道、高架工程等工程建设一般都会穿越软黏土层,如果不对土质进行相应的加固处理,在外荷作用下极易发生较大的压缩变形,产生不均匀沉降,无法满足实际工程的强度和变形要求^[3]。目前,许多加固土体的材料已经广泛用于工程中,其中水泥和石

灰是最常用的加固材料,然而水泥和石灰虽然能有效加固土体,但也同时带来很严重的环境问题。因此,为了减少水泥对环境的影响,已经有很多学者通过在土中添加天然绿色的环保材料对土质进行改良,朱墨沙等^[4]通过在上海黏土中添加石灰粉及建筑垃圾碎末,发现石灰粉对增强土体强度有显著效果,魏丽等^[5]通过在盐渍土中添加麦秸秆,发现麦秸秆能有效增强土的力学性能;Adili等^[6]通过在砂质粉土中添加纸莎草纤维发现对提高砂质粉土的内摩擦角和黏聚力有显著效果;璩继立等^[7]通过在土中添加纳米二氧化硅和玄武岩纤维,并对不同加筋率的试样进行直剪试验,得到两种材料的最优加筋

收稿日期:2019-01-06; 修回日期:2019-02-03

作者简介:曹智民(1995-),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要从事加筋土研究。

通讯作者:璩继立(1964-),男,河南孟州人,博士后,副教授,硕士生导师,主要从事岩土工程、水文地质等方面研究。

率。因此寻找适宜的加筋材料及最优配合比不仅能拓宽加筋材料的种类,对我国的生态文明建设也具有技术指导意义。

黄原胶为多糖物质,通常用作食品添加剂和流变改良剂^[8],其最显著的特征是其假塑性(恢复能力)^[9],在低浓度(大多数食品中为0.5%)下具有较高黏度,同时黄原胶有很高的稳定性,耐盐、酶、酸及高温^[10-11]。实际工程中,黄原胶能对流变性能进行较好控制,因此一直在石油工业中作为钻井液增黏剂使用^[12],同时,黄原胶也常用作混凝土的添加剂增加黏度^[13]。众多学者曾通过添加黄原胶对不同土质进行研究:Chang等^[14]通过在砂、黄土、高岭土、黏土中添加黄原胶后发现,由于黄原胶能与黏土质土体通过氢键相互作用,因此黄原胶对级配良好的土有着更好的加固效果,且用于加固土体最经济有效的含量为1.0%~1.5%;Rashid等^[15]通过在红土中添加黄原胶,发现黄原胶能够显著提升土体强度,且黄原胶与土体的反应主要在28d内发生。因此,本文将通过将黄原胶作为添加剂对上海黏土进行加固研究,探究其改良上海黏土的可行性。同时,本研究还选取了棕榈丝作为另一种加筋材料,由相关文献可以发现,人们很早以前就将棕榈运用于生产生活中,棕榈种植广泛,容易获得,目前主要用于床垫、毛刷及工业复合材料^[16],棕榈作为绿色、环保的材料符合当今生态文明建设的时代主题。陈曦等^[17]曾对棕榈纤维进行腐解速度的研究,发现棕榈纤维具有不易腐蚀、防水、隔热、不易变脆等特性,通过结合李晓龙^[18]的相关研究发现,棕榈纤维韧性强、刚度高、表面摩擦力大,是一种理想型的骨架材料。李贝贝等^[19]、璩继立等^[20]通过选择棕榈片作为加筋材料,发现棕榈片对上海黏土强度及变形能力的提高有显著效果。

本研究选取黄原胶和棕榈丝纤维作为加筋材料,以不同的加筋率探究其对上海黏土的加固效果及养护龄期对加筋土的影响,通过无侧限抗压强度试验,对素土、黄原胶土体混合物、棕榈丝加筋土、黄原胶和棕榈丝加筋土进行对比分析,得到改良上海黏土的最合理的加筋配比,并对其进行机理分析。

2 试验仪器、材料及试样制备

2.1 试验仪器

试验均采用南京土壤仪器厂生产的PY-3型应变控制式无侧限压缩仪。位移测量范围为0~30mm,测力计量力范围为0~600N,应变速率为2.5

mm/min。

2.2 试验材料

本次试验土样取自上海市杨浦区某大型基坑施工现场,土样取回后使其在自然条件下风干并碾碎,使用前过2mm土工筛。通过界限含水率试验和击实试验分别测出土样的液限和塑限及最佳含水率和最大干密度,其主要物理力学性质见表1。本次试验添加的黄原胶选购于某品牌工业级黄原胶,试验添加的棕榈丝纤维取自上海崇明岛,取回后洗净晒干,剪成丝状备用,其物理性质见表2。

表1 试验黏土的物理力学性质

最佳含水率 $W_{opt}/\%$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	最大干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	相对密度
21.68	45.82	22.42	23.40	1.64	2.73

表2 试验用棕榈丝纤维的物理性质

平均厚度/mm	拉伸强度/MPa	相对密度	弹性模量/MPa	自然伸长率/%
0.192~1.240	87~166	1.24	800~1900	5~21

2.3 试样制备

本次试验样品由4大组组成,分别为:素土、黄原胶土体、棕榈丝加筋土、黄原胶和棕榈丝加筋土。制备试样中,选取1.0%、1.5%、2.0%的黄原胶、0.75%、1.00%、1.25%的棕榈丝纤维同素土均匀混合,为减少偶然因素对试验产生影响,试样每组制备3个平行试件,试验共240个样本。制备试样时,在最佳含水率和最大干密度条件下配置混合料,样品均使用高80mm,直径39.1mm的同一圆柱体模具,分3次均匀加土,用击实锤每次敲击27次进行击实制备。对试块两端表面稍作修剪,以避免测试期间出现不均匀的应力分布^[14]。之后用保鲜袋将制备好的试块密封置于标准养护缸内养护,养护时间分布为0、7、14、21、28d。试样的制备及养护均严格执行《公路土工试验规程》(JTG E40-2007)^[21]。将4组样品进行无侧限抗压强度试验,并记录每组试块的无侧限抗压强度(UCS),试验结果见表3。

3 试验结果分析和讨论

3.1 黄原胶对土样强度的影响

图1为不同含量黄原胶土体在7d养护龄期下的应力应变曲线图。由图1可见:素土和黄原胶土体的轴向应力与轴向应变曲线呈倒“V”型,黄原胶

土体的抗压强度明显高于素土。在同一养护龄期内,相对于素土,黄原胶含量为 1.0% 和 2.0% 的无侧限抗压强度增加量不高,含量为 1.5% 的黄原胶土体无侧限抗压强度却有显著提高。与素土相比,黄原胶土体轴向应力随应变增加的速度明显快于素土,1.5% 含量的黄原胶土体到达峰值应力的时间更

快;当黄原胶土体的轴向应力到达峰值后,曲线较素土下降更快,呈现较低的残余强度,且黄原胶含量越高,曲线下降段越为陡峭。说明黄原胶对提升土体的强度确有效果,但黄原胶的加入也降低了土体的延性,且黄原胶含量越高,土体延性越差,脆性破坏越明显。

表 3 试样的无侧限抗压强度值

试样分组	%, kPa						
	黄原胶含量	棕榈丝含量	养护 0d 强度	养护 7d 强度	养护 14d 强度	养护 21d 强度	养护 28d 强度
素土			80.36	85.12	88.12	93.09	95.12
黄原胶土体	1.0		88.40	92.78	100.71	106.40	108.44
	1.5		95.63	102.99	106.94	112.87	117.00
	2.0		90.81	97.04	103.38	109.17	111.92
棕榈丝加筋土		0.75	96.43	103.32	107.92	113.80	116.05
		1.00	110.90	116.61	121.03	125.83	128.41
		1.25	103.66	109.51	115.86	119.35	121.93
黄原胶和棕榈丝加筋土	1.0	0.75	98.04	104.70	112.39	116.58	120.72
	1.0	1.00	107.68	115.76	124.12	128.68	132.22
	1.0	1.25	102.06	109.88	116.75	121.37	124.12
	1.5	0.75	113.31	122.57	130.12	135.08	140.78
	1.5	1.00	110.09	118.32	123.21	129.53	134.12
	1.5	1.25	103.37	113.21	116.91	121.20	127.46
	2.0	0.75	105.27	112.21	119.62	124.82	128.41
	2.0	1.00	99.82	106.40	112.13	116.42	119.92
	2.0	1.25	97.32	103.39	110.21	113.39	116.28

图 2 为养护龄期对黄原胶土体无侧限抗压强度的影响。由图 2 可见,素土和黄原胶土体的无侧限抗压强度均随养护龄期的增加而增大,并且黄原胶土体的抗压强度均大于素土。表 4 为不同含量黄原胶在不同养护龄期下与素土抗压强度的倍数关系表。由表 4 可见在每个养护龄期内,1.5% 的黄原胶土体提高土体抗压强度的效果最为明显。

表 4 不同含量黄原胶在不同养护龄期下与素土抗压强度的倍数关系表

黄原胶含量/%	养护龄期/d					平均值
	0	7	14	21	28	
0.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.0	1.10	1.09	1.14	1.14	1.14	1.12
1.5	1.19	1.21	1.21	1.21	1.23	1.21
2.0	1.13	1.14	1.17	1.17	1.18	1.16

综上所述:黄原胶的加入能够有效提升土体的抗压强度,当黄原胶含量为 1.5% 时,对土样强度的提升最为明显,但是黄原胶的加入也使得土体的延性降低,呈现出较低的残余强度,黄原胶含量越高,脆性破坏越显著。从微观层次看,黄原胶粉末相对于土颗粒更加均匀且有着更小的粒径,在土中掺入黄原胶能够填充土颗粒间的空隙,使得土颗粒排列更加紧凑,大孔隙的尺寸及数量显著减小,提高了土体的密实性,从而提高了土体的强度。但是随着黄原胶含量的增加,过多的黄原胶单体吸附水形成高度黏稠的悬浮液填充了土颗粒间的空间,增加了土体中孔隙的总体积^[15],土体强度将出现下降,本文 2.0% 黄原胶含量的土体强度较 1.5% 黄原胶含量降低也说明了存在一个最优含量使得土体的加固效果最为有效。同时黄原胶的加入降低了土体的塑性指数,使得土体的延性降低,土体更易发生脆性破坏。

3.2 棕榈丝纤维对土样强度的影响

图3为不同含量棕榈丝加筋土在7d养护龄期下的应力应变曲线图。由图3可见:棕榈加筋土的轴向应力与轴向应变曲线呈倒“V”型。在同一养护龄期内,棕榈丝加筋土的抗压强度均明显高于素土。当素土轴向应力达到峰值应力后,棕榈加筋土轴向应力继续上升,1.0%加筋率提升土体强度的效果优于0.75%和1.25%加筋率的土体;在回落阶段,棕榈加筋土的下降速度较素土慢,呈现较高的残余强度,1.0%加筋率的棕榈丝加筋土回落速度最慢。说明添加棕榈丝纤维不但能有效提高土体强度,同时也能提高延性,有效抑制土体的变形。

图4为养护龄期对棕榈丝加筋土无侧限抗压强度的影响。由图4可见,素土和棕榈丝加筋土的无

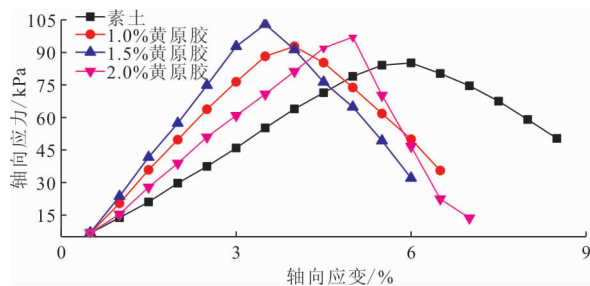


图1 不同含量黄原胶土体在7d养护龄期下应力应变曲线

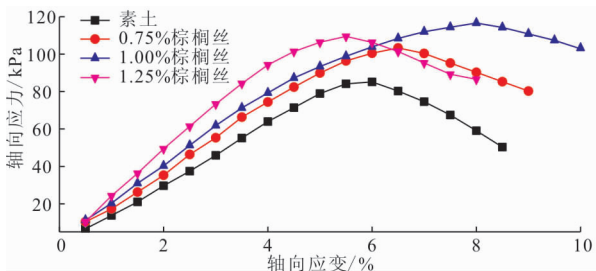


图3 不同含量棕榈丝加筋土在7d养护龄期下应力应变曲线

综上可见:棕榈丝作为一种新型环保的加筋材料,能有效提升土体的抗压强度,改善效果明显优于黄原胶,同时棕榈丝的加入提高了土体的延性,增强了土的抗变形能力。棕榈丝加筋土的抗压强度主要由土与土、土与棕榈丝、棕榈丝与棕榈丝间的摩擦力决定。当棕榈丝加筋土在外荷作用下产生变形时,土与土、土与棕榈丝、棕榈丝与棕榈丝间的摩擦力为阻止这种变形而发生相应改变,其改变的大小主要由筋材的含量决定^[22]。当加筋率较小时,土与筋材间的接触面积较小,摩擦力也就较小,随着加筋率的增大,摩擦力也随之增大,加筋土的强度也就越大;然而,筋材的加入虽然能提高摩擦力,但对土颗粒间

侧限抗压强度均随着养护龄期的增加而增大,并且在各个龄期内,棕榈丝加筋土的抗压强度均大于素土。表5为不同含量棕榈丝在不同养护龄期下与素土抗压强度的倍数关系表。由表5可见棕榈丝的加入对提升土体抗压强度有显著作用,1.0%含量提高土体强度的效果最为明显。

表5 不同含量棕榈丝在不同养护龄期下与素土抗压强度的倍数关系表

棕榈丝含量/%	养护龄期/d					平均值
	0	7	14	21	28	
0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.75	1.20	1.21	1.22	1.22	1.22	1.21
1.00	1.38	1.37	1.39	1.35	1.35	1.37
1.25	1.29	1.29	1.31	1.28	1.28	1.29

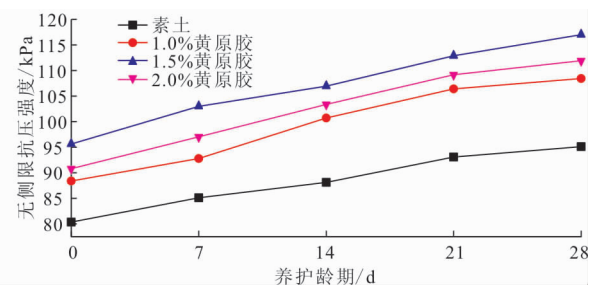


图2 养护龄期对黄原胶土体无侧限抗压强度的影响

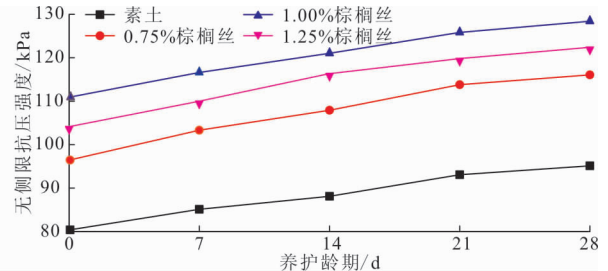


图4 养护龄期对棕榈丝加筋土无侧限抗压强度的影响

的孔隙率也有较大影响^[22-23],当加筋率较大时,过多的筋材容易在土中发生重叠,无法保证筋材与土之间有效接触,减弱了土颗粒间的联结,降低了土的强度;加筋率适宜时,棕榈与土间的摩擦力能够得到充分发挥,筋材间的相互交错形成空间约束作用^[24],保证了试块的完整性,提高了土的强度和延性,一定程度上减小了试块发生脆性破坏的可能。

3.3 黄原胶和棕榈丝纤维对土样强度的综合影响

图5为不同含量黄原胶和棕榈丝加筋土样在7d养护龄期下的应力应变曲线图。由图5可以看到:在7d养护龄期时,黄原胶和棕榈丝加筋土的抗压强度均大于素土。当黄原胶含量为1.0%时,添加1.0%棕榈丝纤维,试块的抗压强度最大;当黄原

胶含量为1.5%时,添加0.75%棕榈丝纤维,试块的抗压强度最大;当黄原胶含量为2.0%时,添加1.0%棕榈丝纤维,试块的抗压强度最大,且三者相比,1.5%黄原胶0.75%棕榈丝加筋土的抗压强度最大。相对于素土,黄原胶含量为1.0%时,棕榈丝加筋率0.75%、1.0%、1.25%达到峰值应力的速度略快于素土,且棕榈丝含量越高,下降速度更加缓慢,1.25%加筋率的试块最为明显;黄原胶含量为1.5%时,棕榈丝加筋率0.75%、1.0%、1.25%达到峰值应力的速度均比素土要快,下降趋势也较素土更加缓慢;黄原胶黄原胶含量为2.0%时,棕榈丝加

筋率0.75%、1.0%、1.25%达到峰值应力的速度略慢于素土,且下降速度较素土略快。

图6为不同养护龄期对黄原胶和棕榈丝加筋土样的影响曲线图。从图6可以看出:黄原胶棕榈丝加筋土的无侧限抗压强度均随着养护龄期的增加而增大,并且在各个龄期内,黄原胶和棕榈丝加筋土的抗压强度均大于素土。表6为不同含量黄原胶和棕榈丝在不同养护龄期下与素土抗压强度的倍数关系表。由表6可见,1.5%黄原胶0.75%棕榈丝对土样提升幅度最大,并且其延性较素土也有显著提高。因此,最优加筋方案是1.5%黄原胶和0.75%棕榈丝纤维。

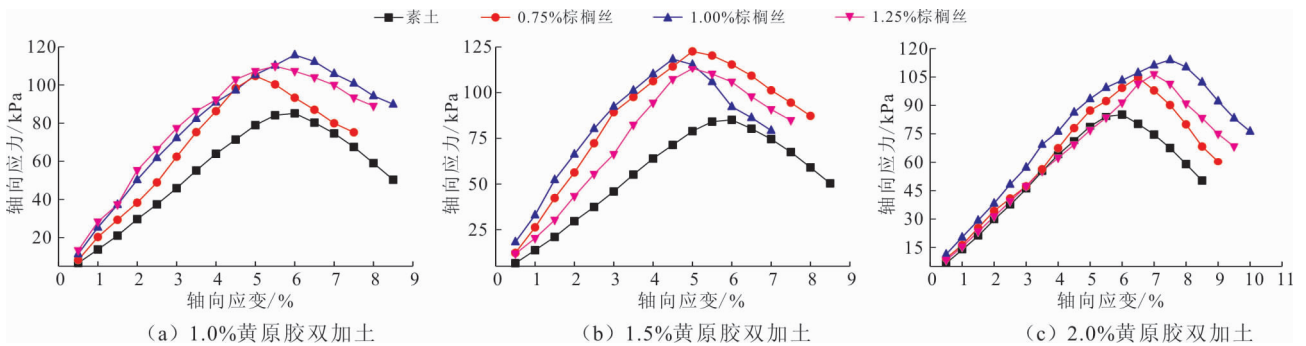


图 5 不同含量黄原胶和棕榈丝加筋土样在 7d 养护龄期下的应力应变曲线

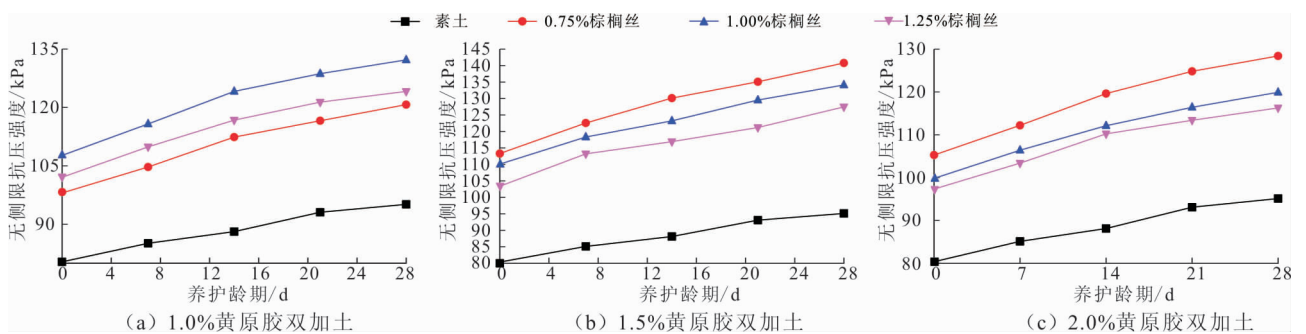


图 6 不同含量黄原胶和棕榈丝纤维加筋土样无侧限抗压强度随养护龄期的变化

表 6 不同含量黄原胶和棕榈丝在不同养护龄期下与素土抗压强度的倍数关系表

黄原胶含量/%	棕榈丝含量/%	养护龄期/d					平均值
		0	7	14	21	28	
0.0	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.75	1.22	1.23	1.28	1.25	1.27	1.25
1.0	1.00	1.34	1.36	1.41	1.38	1.39	1.38
	1.25	1.27	1.29	1.32	1.30	1.30	1.30
1.5	0.75	1.41	1.44	1.48	1.45	1.48	1.45
	1.00	1.37	1.39	1.40	1.39	1.41	1.39
2.0	1.25	1.29	1.33	1.33	1.30	1.34	1.32
	0.75	1.31	1.32	1.36	1.34	1.35	1.34
2.0	1.00	1.24	1.25	1.27	1.25	1.26	1.25
	1.25	1.21	1.21	1.25	1.22	1.22	1.22

由图5、6可以看出,当试块达到峰值应力后,相较于黄原胶土体,土体的强度和延性均有明显提升;相较于棕榈丝加筋土,抗压强度得到显著提高。可以看出,在土体中同时加入黄原胶和棕榈丝纤维,可提高土体的抗压强度、残余强度和抗裂性。棕榈丝纤维掺入黄原胶土体混合物后,因为黄原胶吸附水形成高度黏稠的悬浮液,棕榈丝在土体中处于杂乱均匀分布,在竖向荷载作用下,土体产生相对位移,棕榈丝在黏稠悬浮液作用下相互交织,在土体中形成空间约束作用,约束了土体的变形和位移的产生,增强了土体的抗压强度;同时黄原胶土体混合物的密实度也较大地增强了棕榈丝纤维在土样中的抗拉能力,当土样在复杂应力作用下,棕榈丝能够承担很

大一部分的拉应力,增强了土体的抗变形能力,可有效防止试块的瞬间破坏,提高了土体的延性,呈现出较高的残余强度。

4 结 论

(1) 黄原胶作为加筋材料提高了土体的抗压强度,但同时也增大了土体的脆性。

(2) 棕榈丝纤维作为加筋材料能够有效提升上海黏土的抗压强度,同时提高了土体的延性。

(3) 黄原胶和棕榈丝纤维同时作为加筋材料提高了上海黏土的抗压强度,且强度与养护龄期成相关。与黄原胶土体相比,提高了土体的抗压强度和残余强度,减小了发生脆性破坏的可能,与棕榈丝加筋土相比,提高了土体的抗压强度。

(4) 当土中加入 1.5% 黄原胶、0.75% 棕榈丝纤维时,土体抗压强度最大,且在龄期为 28 d 时达到最大值,与素土相比,强度提高了 48%。

从上述结论中可以看出,将黄原胶、棕榈丝纤维作为加筋材料,可以有效改善上海黏土的工程性质,同时拓宽加筋材料的种类。本研究只是提供了增强上海黏土强度的一种方法,但是在实际工程中,还需对诸如施工工艺、防腐时间等可行性进行系统研究。

参考文献:

[1] 严学新,史玉金.上海市工程地质结构特征[J].上海地质,2006(4):19-24.

[2] 周学明,袁良英,蔡坚强,等.上海地区软土分布特征及软土地基变形实例浅析[J].上海地质,2005(4):6-9+61.

[3] GONG SHILIANG, LI Cai, YANG Shilun. The microscopic characteristics of Shanghai soft clay and its effect on soil body deformation and land subsidence[J]. Environmental Geology, 2009, 56(6):1051-1056.

[4] 朱墨沙, 璩继立. 建筑垃圾碎末和石灰粉对上海黏土抗压强度的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 229-235.

[5] 魏丽, 柴寿喜, 蔡宏洲, 等. 麦秸秆的筋土摩擦性能及加筋作用[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(6): 53-59.

[6] ADILI A A, AZZAM R, SPAGNOLI G, et al. Strength of soil reinforced with fiber materials (Papyrus)[J]. Soil Mechanics & Foundation Engineering, 2012, 48(6):241-247.

[7] 璩继立, 胡晨凯, 赵超男. 玄武岩纤维和纳米二氧化硅加筋上海黏土的抗剪强度试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 186-192.

[8] ROSALAM S, ENGLAND R. Review of xanthan gum production from unmodified starches by xanthomonas compress-tris sp. [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, 39(2):197-207.

[9] LATIFI N, HORPIBULSUK S, MEEHAN C L, et al. Xanthan gum biopolymer: an eco-friendly additive for stabilization of tropical organic peat[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(9):825.

[10] 王小金. 黄原胶的化学改性性能研究[D]. 山东: 山东大学, 2015.

[11] SUN Changhui, GUNASEKARAN S. Effects of protein concentration and oil-phase volume fraction on the stability and rheology of menhaden oil-in-water emulsions stabilized by whey protein isolate with xanthan gum[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(1):165-174.

[12] CABALAR A F, CANAKCI H. Direct shear tests on sand treated with xanthan gum[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 2011, 164(2):57-64.

[13] CHANG I, CHO G C. Strengthening of Korean Residual Soil with α -D-glucan Biopolymer[J]. Construction & Building Materials, 2012, 30:30-35.

[14] CHANG I, IM J, PRASIDHI A K, et al. Effects of xanthan gum biopolymer on soil strengthening[J]. Construction and Building Materials, 2015, 74:65-72.

[15] 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.

[16] ZHAI S, LI D, PAN B, et al. Tensile strength of windmill palm (Trachycarpus fortunei) fiber bundles and its structural implications[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(2): 949-959.

[17] 陈曦, 李永梅, 郑毅. 稻草、黄麻纤维、棕榈叶的吸水性和腐解速率研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2009, 24(2):260-264.

[18] 李晓龙. 棕榈纤维的基本性能研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012:20-24.

[19] 李贝贝, 璩继立, 魏天乐, 等. 提高上海粘土强度的加筋试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4):190-194.

[20] 璩继立, 俞汉宁, 江海洋, 等. 棕榈丝与麦秸秆丝加筋土无侧限抗压强度比较[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5):1216-1220.

[21] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程: LJTGE40-2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

[22] 璩继立, 赵冬雪, 李贝贝. 加筋条件对棕榈加筋土强度的影响[J]. 工业建筑, 2015, 45(3):115-119+129.

[23] 张瑞敏, 王晓燕, 柴寿喜. 稻草加筋土和麦秸秆加筋土的无侧限抗压强度比较[J]. 天津城市建设学院学报, 2011, 17(4):232-235.

[24] 魏丽, 柴寿喜, 蔡宏洲, 等. 麦秸秆加筋滨海盐渍土的抗剪强度与偏应力应变[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1):109-114.