

# 提高上海粘土强度的加筋试验研究

李贝贝, 璩继立, 魏天乐, 江海洋, 俞汉宁

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:**为解决因大孔隙与高压缩引起土的强度降低问题,采用棕榈加筋上海粘土来提高其强度。选择棕榈加筋率、加筋尺寸作为影响因素,对其进行直剪慢剪、CBR及无侧限抗压强度的试验研究。试验结果表明:棕榈加筋土能够显著提高上海粘土抗剪强度、抗压强度及抗变形能力。最适宜的棕榈加筋尺寸为6 mm × 12 mm。直剪慢剪试验的最佳加筋率为0.6%,CBR及无侧限抗压强度试验的最佳加筋率为0.8%。同时通过试验研究,分析加筋土强度变化的原因,掌握棕榈加筋对上海粘土影响的变化规律。

**关键词:**粘土;加筋作用;棕榈;抗剪强度;抗压强度

中图分类号:TU433

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)04-0190-05

## Study on reinforcement test on improving strength of shanghai clay

LI Beibei, QU Jili, Wei Tianle, Jiang Haiyang, Yu Hanning

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

**Abstract:** To solve the reducing problem of soil strength caused by large pores and high compression, the paper used palm to mix in shanghai clay to improve its strength, and selected palm reinforcement rate, reinforcement size as influence factors and did direct slow shear test, CBR test and unconfined compressive strength test. The results showed that palm reinforced soil can significantly improve shanghai clay shear strength, compressive strength and resistance deformation ability. The optimum size of palm reinforcement is 6mm × 12mm. The best reinforcement rate of direct slow shear test is 0.6%. The best reinforcement rate of CBR and unconfined compressive strength test is 0.8%. At the same time, Through the analysis of change reasons of palm reinforced shanghai clay, the paper mastered the change rule of influence of palm reinforced shanghai clay.

**Key words:** clay; reinforced function; palm; shear strength; compressive strength

## 1 研究背景

土的强度是土力学研究的重要课题之一<sup>[1]</sup>。无论是地基还是路堤,均需要一定的强度和抗变形能力,特别是强度一定要满足<sup>[2-4]</sup>。上海地区是典型的软粘土分布区,粘土的高含水量、大孔隙比、高压缩性等可引起土的强度降低,造成强度不满足工程要求的状况<sup>[5-6]</sup>。所以在利用上海粘土时,需要提前加固处理。

室内试验已验证,在土中掺入一定量的纤维可提高土的强度<sup>[7]</sup>。Manbeian<sup>[8]</sup>采用室内直剪试验分别研究了大麦、向日葵的根系对土体的抗剪强度有

增强的作用。Parbakar等<sup>[9]</sup>通过剪切和抗压强度试验得到不同加筋长度、不同加筋率条件下,剑麻纤维加筋土存在最大强度值;张瑞敏等<sup>[10]</sup>通过无侧限抗压强度试验分别比较了稻草和麦秸秆加筋土在加筋长度、质量加筋率不同时对土的加筋效果。李敏<sup>[11]</sup>利用三轴试验比较了试件尺寸不同的情况下麦秸秆提高滨海盐渍土强度的效果。纤维可以提高土的强度,但最大化提高土的强度还需考虑纤维的一些影响因素。

棕榈是一种易获的、价格低廉的天然纤维。并且具有韧性强、抗腐蚀、表面摩擦大等性能<sup>[12]</sup>。因此本文选择棕榈作为提高上海粘土强度的筋材。对

收稿日期:2014-01-23; 修回日期:2014-03-23

基金项目:诺华上海实验室科研经费项目(3A-11-307-110)

作者简介:李贝贝(1988-),女,河南漯河人,硕士研究生,研究方向:岩土工程。

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、水文地质等方面的研究与教学工作。

不同条件下加筋试件进行直剪慢剪试验、无侧限抗压强度试验和 CBR 试验,研究提高上海粘土强度的适宜加筋条件,并对其加筋影响因素进行分析。

## 2 试验仪器、材料和试验方案

### 2.1 试验仪器

直剪慢剪试验采用南京河海南水电自动化公司生产的 DJY-4L 四联等应变直剪仪。采取应变控制式直接剪切。应变速率为 0.02 mm/min,目的是使粘土充分排水,使测得的剪切强度比较稳定,当剪应变达到 10.001 mm 时,停止剪切。

CBR 试验采用浙江土工仪器制造有限公司的 STCBR-1 承载比实验仪。速率为 1.25 mm/min。

无侧限抗压强度试验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。其位移测量范围为 0~30 mm,升降速率为 2.3~2.7 mm/min。

### 2.2 试验材料

试验用土取自某大型基坑项目施工现场,取回后将土重新碾碎过 2 mm 土工筛。并测得其最大干密度为 1.62 g/cm<sup>3</sup>,最佳含水率为 20.72%,液限含水率为 42.34%,塑限含水率为 20.56%。

棕榈取自上海崇明岛。取回后自然风干以做备用。其中棕榈的物理性能如下表:

物理性能	指标范围
平均厚度	0.192~1.240
拉伸强度	87~166
比重	1.24
弹性模量	800~1900
自然伸长率	5~21

### 2.3 试验方案

将质地密集的棕榈称为棕榈的上部结构,质地密集一般的称为下部结构。将处理后的棕榈下部剪成 6 mm×6 mm, 6 mm×12 mm, 6 mm×18 mm 的片状,直剪慢剪试验分别以 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.6%, 0.8% 的加筋率将棕榈加入土中搅拌均匀,放入养护缸中养护一昼夜。然后按《公路土工试验规程》<sup>[13]</sup>中制样,使试样高 20 mm,直径 61.8 mm。垂直荷载分别为 100、200、300 kPa,每组制备 3 个试样。无侧限抗压试验按照 0.1%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0% 的加筋率配置试样。制得试样直径为 39.1 mm,高度为 80 mm,每组制备 3 个试样。CBR 试

验按照 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0% 的加筋率在土中混合棕榈,选用的试筒内径 152 mm,高 170 mm,每组制备 3 个试样。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 直剪慢剪试验

试验结果所得的粘聚力和内摩擦角见表 2、表 3。

表2 加筋率、棕榈尺寸与粘聚力关系试验数据

加筋率	%, mm			
	0	6×6	6×12	6×18
0	26.87	26.87	26.87	26.87
0.1	26.87	29.37	31.36	32.33
0.2	26.87	31.80	40.53	33.50
0.3	26.87	36.37	46.40	36.43
0.4	26.87	42.63	54.40	49.43
0.6	26.87	42.30	58.53	53.60
0.8	26.87	40.13	45.70	43.87

表3 加筋率、棕榈尺寸与内摩擦角关系试验数据

加筋率	%, mm			
	0	6×6	6×12	6×18
0	21.58	21.58	21.58	21.58
0.1	21.58	21.60	22.78	21.88
0.2	21.58	22.20	21.55	22.49
0.3	21.58	22.20	21.55	23.10
0.4	21.58	22.78	22.78	22.17
0.6	21.58	24.23	23.70	22.49
0.8	21.58	22.20	23.39	22.51

从表 2 中可以看出,加入棕榈片后,相对于素土,加筋土的粘聚力都有所提高。对于同一尺寸的棕榈,当加筋率小于某一加筋率时,粘聚力随加筋率的增大而增大,超过这一加筋率时,粘聚力反而随加筋率的增大而减小,这说明对于粘聚力而言存在最佳加筋率。棕榈尺寸为 6 mm×12 mm, 6 mm×18 mm 的加筋土的粘聚力均为加筋率 0.6% 时最大,而棕榈尺寸为 6 mm×6 mm 的加筋土加筋率为 0.4% 时粘聚力比 0.6% 时高了 0.7%,几乎是一样的。这可能是筋材在 0.6% 时未充分混合均匀造成的。因此定义最佳加筋率为 0.6%。试验中,当加筋率小于 0.6% 时,筋材不能与土充分作用,不能最大发挥加筋土的强度,使其粘聚力增大;筋材大于 0.6% 时,筋材会重叠在一起,使土颗粒之间发生隔断,破坏了土的整体性,造成土的粘聚力降低;只有当加筋率适宜时,土与筋材充分作用,相互弯曲交织的筋材

会形成空间约束作用,阻碍土受力产生的位移<sup>[14]</sup>,使土的粘聚力增大。当加筋率一定时,通过比较,棕榈尺寸为 $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的加筋土粘聚力最大,其中,相对于素土,棕榈尺寸为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 、 $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 、 $6\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ 的加筋土粘聚力分别提高了58%、118%、99%。因此,加筋率一定时,棕榈尺寸为 $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的加筋土的粘聚力提高幅度最大。究其原因,为土中加入纤维,纤维越长,与土间的摩擦面越大,加筋的效果会越明显;但当纤维的长宽比超过一定值后,纤维容易发生重叠,形成薄弱面,产生较小的裂缝,使其粘聚力降低<sup>[15]</sup>。综合而言,当棕榈尺寸为 $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ ,加筋率为0.6%时,棕榈加筋土的粘聚力提高最大。

从表3可以看出。无论是加筋率一定还是棕榈尺寸一定时,棕榈加筋土的内摩擦角与素土的内摩擦角均相差不大。相对于素土,棕榈尺寸为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 、 $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 、 $6\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ 的内摩擦角最大值分别提高了5%、9%、4%。相对于粘聚力的提高,内摩擦角相当于没有变化。所以加入棕榈筋材后,对土的粘聚力提高较大,摩擦角几乎不变。且 $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ ,0.6%加筋率的加筋土效果最好。

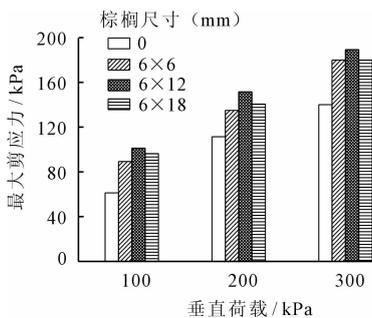


图1 加筋率为0.6%时,不同荷载下各尺寸的棕榈加筋土的最大剪应力

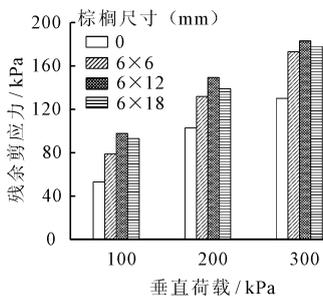


图2 加筋率为0.6%时,不同荷载下各尺寸的棕榈加筋土的残余剪应力

由于图形过多,各垂直荷载下的应力-应变图不再一一列出,图1、2是加筋率为0.6%不同荷载下各尺寸的棕榈加筋土的剪应力、残余剪应力变化

图。由表2、3可知,加筋率为0.6%时加筋效果最好。从测得数据中也可以知道,加筋率为0.6%时,剪切强度最大。

从图1、2可以看出,无论是最大剪应力还是残余剪应力,随着垂直荷载的增大而增大,这是因为约束越大,土越不易变形。与素土相比,最大剪应力与残余剪应力强度有所提高。同一荷载下,棕榈尺寸为 $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 加筋土的最大剪应力和残余剪应力最大。加筋率为0.6%时,相对于素土,棕榈尺寸为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 、 $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 、 $6\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ 的最大剪应力与残余剪应力100 kPa时提高了46%、65%、57%、55%、84%、75%。200kPa时提高了21%、36%、26%、28%、45%、35%。300kPa时提高了29%、35%、29%、33%、41%、37%。可见棕榈加筋土最佳适宜加筋尺寸为 $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 。从数值上可以看出,100 kPa时强度增幅最大,且残余剪应力的强度增幅比最大剪应力增幅大,这说明棕榈不仅使土的抗剪强度提高了,同时在较大应变处仍有较大的抗剪强度,提高了土的抗变形能力。

### 3.2 CBR 试验

对各种棕榈加筋土估 CBR 试验结果见图3、4。如图3可知,棕榈作为筋材加入土中,对 CBR 值的提高起到了积极作用。试验中从素土到加筋率0.8%,加筋土的 CBR 值一直在增大,从加筋率0.8%到1.0%,CBR 值降低,但仍高于素土的 CBR 值。所以,对于棕榈改良上海粘土的 CBR 试验,存在最优加筋率。

图3中的三条曲线,随着加筋率的逐渐增大,各条曲线间的间距逐渐分离,并在加筋率为0.8%处出现拐点。在同一加筋率下,棕榈尺寸为 $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的 CBR 增幅最大, $6\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ 的次之, $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的增幅最小。当加筋率为0.8%时,棕榈尺寸为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 、 $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 、 $6\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ 的 CBR 分别是素土的1.46、1.91、1.77倍。数值也显示,棕榈尺寸为 $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的加筋土的 CBR 最大。因此,对于棕榈加筋土来说,加筋率为0.8%,尺寸为 $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$  CBR 的值增幅最大。

### 3.3 无侧限抗压强度试验

对各种棕榈加筋土做无侧限抗压强度试验,结果见图4、5。

由图4可知,不同棕榈尺寸的加筋土随着加筋率的变化呈现先增大后减小的变化,出现了明显的拐点,在加筋率为0.8%时无侧限抗压强度达到最大值。究其原因,是加入棕榈筋材后,增加了土的孔

隙度,当筋材少量时,由于筋材的弹性模量大于土的弹性模量,在保证土的孔隙度不致破坏土的整体性的前提下,其增加了土的抗压性能;当筋材多时,土的孔隙度增大了,过大的孔隙度将抵消加筋对抗压强度的增强效果,甚至会削弱抗压强度,同时筋材过多时,筋材会在土中重叠,使土颗粒间的联结减弱,从而降低抗压强度。

由图5可知,各含水率的无侧限强度的数值均在素土之上。筋材长度的不同也影响着无侧限抗压强度的大小。试验中选取的筋材长度均能增加抗压强度。除了加筋率为0.1%不明显外,其余均有明显的拐点。当加筋率不同时,尺寸为6 mm×12 mm无侧限抗压强度最大。究其原因是一定加筋尺寸的

筋材可以有效发挥筋材交织与弯曲加筋作用。筋材过小时,土中产生的裂纹会绕过筋材继续发展;筋材过长时,会在土中形成薄弱面,使筋材与土的作用得到抑制<sup>[16-17]</sup>。

从图4、5可以看出,当筋材加筋率为0.8%,尺寸为6 mm×12 mm时无侧限抗压强度最大。当加筋率为0.8%时,棕榈尺寸为6 mm×6 mm、6 mm×12 mm、6 mm×18 mm时,抗压强度出现峰值时,应变为素土应变的1.46、3.01、2.50倍,抗压强度为素土的1.67、1.73、1.60倍。可以看出,加入棕榈后,强度提高了,应变相对于素土延迟了,所以棕榈可作为一种筋材加固上海粘土的抗压强度,延缓其临界荷载的发生。

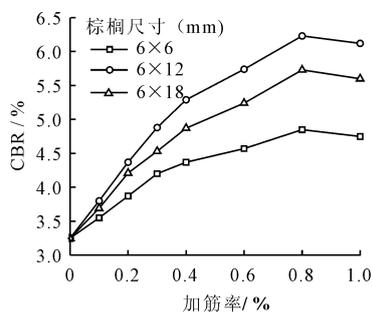


图3 加筋率与CBR关系图

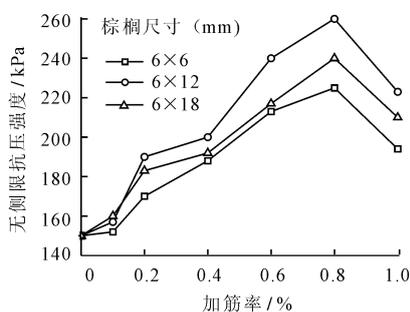


图4 加筋土的无侧限抗压强度随加筋率的变化

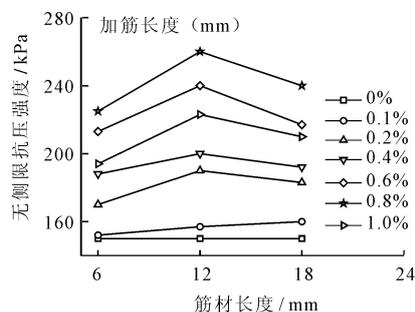


图5 加筋土的无侧限抗压强度随筋材长度的变化

## 4 结果分析

从实验结果得出,将棕榈片混入土中,可以提高上海粘土的剪切强度、CBR和无侧限抗压强度。但由于实验特性,其剪切强度、CBR和无侧限抗压强度因筋材的尺寸和含量有所异同。

当筋材尺寸为6 mm×12 mm时,棕榈加筋土的剪切强度、CBR和无侧限抗压强度均达到了最大值。这说明尺寸为6 mm×12 mm的棕榈片,能够与土充分混合,充分发挥筋材与土的作用,使得抗剪强度、CBR和无侧限抗压强度达到最大。反之,尺寸过小,棕榈片不能够充分与土接触,不能使土与筋材之间的摩擦力充分发挥;尺寸过大,会造成棕榈片相互重叠,抑制其相互作用效果。

棕榈加筋土的剪切强度、CBR和无侧限抗压强度因加筋率的不同而有所变化。在一定加筋率之下,其剪切强度、CBR和无侧限抗压强度均随加筋率的增大而增大,超过固定加筋率后,其强度反而降低。棕榈加筋土剪切强度的最佳加筋率为0.6%, CBR和无侧限抗压强度的最佳加筋率为0.8%。这

主要是因为剪切试验表现的主要是棕榈片的抗拉性能,产生的是剪切形变,而CBR和无侧限抗压强度试验表现的主要为棕榈片与土的抗压性能,产生的是压缩形变。当筋材含量为0.6%时,棕榈片能够充分发挥拉伸性能,加筋率过少,棕榈的剪切不能充分发挥,过多则会产生重叠,棕榈片之间相互抑制。当加筋率为0.8%时,棕榈与土混合后,能够将其抗压能力充分发挥,使CBR与抗压强度达到最大。

## 5 结语

试验是在土壤特性、含水率、筋材尺寸及试件尺寸一定的条件下得到的,并未进行工程中的现场实践,所以只是提供了一种提高上海粘土强度的方法,对提高上海粘土强度提供了理论意义。通过试验可以得到以下结论:

(1) 棕榈加筋土可提高上海粘土的抗剪强度、CBR值以及无侧限抗压强度。

(2) 对于3种试验,最适宜的加筋尺寸为6 mm×12 mm。直剪慢剪试验最佳加筋率为0.6%, CBR试验及无侧限抗压试验最佳加筋率为0.8%。

(3) 直剪慢剪试验主要表现为粘聚力的增长,内摩擦角影响不大。最大抗剪强度与相应的残余强度比素土提高了75%与84%,抗变形能力也有所提高。

(4) 加筋率为0.8%,棕榈尺寸为6 mm × 12 mm时,CBR值增加的幅度最大,为素土的1.91倍。

(5) 无侧限抗压强度随加筋率与加筋尺寸呈现先增大后减小的趋势。加筋率为0.8%,棕榈尺寸为6 mm × 12 mm的加筋土达到最大值,为素土的1.73倍,应变为素土的3.01倍,使土体的变形得以延迟。

#### 参考文献:

- [1] 刘恩龙,沈珠江. 结构性土的强度准则[J]. 岩土工程学报,2006,28(10):1248-1252.
- [2] 中国建筑科学研究院地基研究所. GB505007-2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [3] 璩继立,蒯会勇. 盾构施工地面长期沉降的神经网络预测[J]. 上海地质,2004,25(3):42-46.
- [4] 中交第二公路落勘察设计院. JTG D30-2004 公路路基设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [5] 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.
- [6] 门福录. 上海粘土流变性质及地面沉降问题初步研究(一)[J]. 自然灾害学报,1999,8(3):117-126.
- [7] 余沛,柴寿喜,王晓燕,等. 麦秸秆加筋滨海盐渍土的加

筋效应及工程应用问题[J]. 天津城市建设学院学报,2010,16(3):161-166.

- [8] Manbeian T. The influence of soil moisture suction, cyclic wetting and drying, and plant roots on shear strength of cohesive soil[D]. Berkeley: University of California,1973.
- [9] Prabakar J,Sridhar R S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil[J]. Construction and Building Materials,2002,16(2):123-131.
- [10] 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.
- [11] 李敏,柴寿喜,王晓燕,等. 以强度增长率评价麦秸秆加筋盐渍土的加筋效果[J]. 岩土力学,2011,32(4):1051-1056.
- [12] 刘晓霞,茅琛. 棕叶纤维性能研究[J]. 上海纺织科技,2006,34(9):20-21.
- [13] 中华人民共和国交通部. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京:人民交通出版社:2007.
- [14] 魏丽. 麦秸秆加筋固化滨海盐渍土的筋材防腐与力学特性研究[D]. 天津:天津城市建设学院,2007.
- [15] 魏丽,柴寿喜,蔡宏洲. 麦秸秆防腐评价及加筋滨海盐渍土的补强机制[J]. 工程勘察,2009,37(1):5-7.
- [16] 杨继位,柴寿喜,王晓燕,等. 以抗压强度确定麦秸秆加筋盐渍土的加筋条件[J]. 岩土力学,2010,31(10):3260-3264.
- [17] 石茜. 稻草加筋滨海盐渍土的强度与变形特性[D]. 兰州:兰州大学,2011.

(上接第189页)

- [7] 曹相生,刘杰,孟雪征. 滤速对慢滤池深度处理生活污水的影响[J]. 生态环境学报,2010,19(8):1947-1950.
- [8] 刘来胜,周怀东,刘玲花,等. 生物慢滤技术中的微生物作用研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2013,11(2):137-143.
- [9] 李丽,王琳,李文露,等. 生物慢滤对污染物的去除效果研究[J]. 化学与生物工程,2012,29(1):76-78.
- [10] 中本信忠. 安全饮用水生物净化法指南[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [11] Ruiz - Marin A, Mendoza - Espinosa L G, Stephenson T.

Growth and nutrient removal in free and immobilized green algae in batch and semi-continuous cultures treating real wastewater [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(1): 58-64.

- [12] Ruiz J, Álvarez P, Arbib Z, et al. Effect of nitrogen and phosphorus concentration on their removal kinetic in treated urban wastewater by chlorella vulgaris [J]. International Journal of Phytoremediation, 2011,13(9):884-896.
- [13] 刘来胜,周怀东,刘玲花,等. 生物慢滤技术脱氮性能试验研究[J]. 中国农村水利水电,2013(5):81-84.