

含水率和加筋条件对棕榈加筋土的影响

黄晓如, 璩继立

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 通过击实试验、无侧限抗压试验, 将加筋土与未加筋土的无侧限抗压强度、破坏时的轴向应变和正割模量相比较, 研究了含水率对不同加筋条件下棕榈加筋土抗压强度和变形的影响, 并从能量吸收能力角度说明含水率和加筋条件对加筋土强度和变形的影响。结果表明: 增强土样抗压强度的适宜加筋率和筋材长度分别为 0.5% 和 20 mm; 且土样在具有最优含水率的条件下, 纤维增强效果最佳, 在最优含水率附近纤维增强效果都成降低趋势; 加筋土的能量吸收能力随加筋率、纤维长度、含水率的增加而增加; 纤维的加入降低了土体的刚度。另外, 土样的破坏形态由未加筋土单一剪切面的脆性破坏逐渐转变为加筋土多剪切面的塑性破坏。

关键词: 棕榈纤维; 黏性土; 无侧限; 强度; 变形; 能量吸收能力

中图分类号: TU 411.6

文献标志码: A

Influence of Water Content and Reinforcement Conditions on Palm Reinforced Soil

HUANG Xiaoru, QU Jili

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

Abstract: Through compaction tests and unconfined compression tests, the unconfined compressive strength, axial strain and secant modulus of reinforced soil and unreinforced soil were compared. The influence of water content on the compressive strength and deformation of palm reinforced soil under different reinforcement conditions was studied. The influence of water content and reinforcement conditions on the strength and deformation of reinforced soil was explained from the angle of energy absorption capacity. The results show that the optimum reinforcement ratio and length of reinforcement are 0.5% and 20 mm respectively, and the effect of fiber reinforcement is the best when the soil sample has the optimum water content, and the effect of fiber reinforcement decreases near the optimum water content. The energy absorption capacity of reinforced soil increases with the increase of reinforcement ratio, fiber length, and water content, while the addition of fiber reduces the stiffness of soil. In addition, the failure mode of soil samples gradually changes from the single-shear-plane brittle failure of unreinforced soil to the multi-shear-plane plastic failure of reinforced soil.

Keywords: palm fiber; clay; unconfined; strength; deformation; energy absorption capacity

收稿日期: 2018-04-18

第一作者: 黄晓如(1993-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 岩土工程. E-mail: 1533495368@qq.com

通信作者: 璩继立(1964-), 男, 副教授. 研究方向: 岩土工程. E-mail: qujili@sina.com

我国上海、广州、深圳等地都分布着较为典型的天然软土地基。严学新等^[1]研究了上海市工程地质结构特征，其主要有含水率高、孔隙比大、压缩性高、强度低等特点，这不仅影响工程建设的投资，还直接影响建筑物的使用性能和工程质量。因此，实际工程中特别需要对黏土进行固化处理，以满足基础工程要求。

Ghavami 等^[2]认为在土中掺加一定数量的天然纤维可提高复合土体强度；魏红卫等^[3]研究了影响加筋土强度的因素；Adili 等^[4]通过在土体中随机加入纸莎草纤维，研究出纸莎草纤维是一种合适的土体加固材料；杨继位等^[5]通过对麦秸秆加筋滨海盐渍土进行抗压试验及正交试验得出加筋率(纤维含量)对土体强度的影响；Prabakar 等^[6]研究得出剑麻纤维可对土体强度产生影响；李敏等^[7]通过无侧限抗压强度试验分析了不同尺寸的麦秸秆对土体抗压强度增长的影响；杜鹏^[8]通过对稻草加筋土进行无侧限抗压强度试验分析了筋材形状对土体抗压强度的影响；闫宁霞等^[9]研究出在固化土中适当加入聚丙烯纤维可提高固化土的抗压强度；丁万寿等^[10]研究了含水率对膨胀土的影响；胡展飞等^[11]研究了含水率对软黏土抗剪强度的影响；倪九派等^[12]研究了干密度和含水率对岩溶地区黄壤抗剪强度的影响。由此可见，通过加筋可加强筋土的摩擦作用和空间约束作用，改善土的工程性质。这种将天然纤维材料运用于软土加固的方法是对我国生态文明建设的有益探索。

我国的棕榈产量高，是较易获得的环境友好型天然纤维。李晓龙^[13]、刘晓霞等^[14]研究了纤维的基本性质，认为棕榈纤维具有牢固、耐磨、耐盐、透气、质轻、富有弹性、耐腐蚀等特性，其拉伸强度、弹性模量和自然伸长率范围分别为 87~166 MPa、800~1 900 MPa 和 5%~21%，属于中强高伸纤维；璩继立等^[15]研究出麦秸秆和棕榈可提高黏性土抗压强度；李陈材等^[16]发现一定的含水率是麦秸秆发挥加筋性能的必要条件；璩继立等^[17-20]探究出增加黏土抗拉和抗压强度的棕榈纤维最优长宽比为 1:3，并通过直剪试验，分别探讨了棕榈纤维加筋土和在棕榈纤维加筋土中复掺纳米 SiO₂ 对土体抗剪强度、黏聚力、内摩擦角的影响。本文通过无侧限抗压试验，用棕榈作为加筋材料，进一步研究了土体含水率和筋材长度对棕榈加筋黏性土无侧限抗压强度和变形的影响，

并重点分析了复合土体的刚度变化、能量吸收能力及其破坏模式。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究用土取自上海市郊某大型项目施工现场，距地表以下 1.5 m。将收集的土烘干，粉碎并通过 2 mm 筛进行筛分。根据公路土工试验规程(2007)进行试验，并将试验结果(土样的物理性能)总结于表 1 中，按照土的分类标准 GBJ 145—90，土类属 CL(低液限黏土)。市售的棕榈用作加筋材料，本研究使用的棕榈纤维零吸湿值，其物理性能见表 2。

表 1 土的物理性能指标
Tab.1 Physical properties of soil

最优含水率/ %	液限/ %	塑限/ %	塑性指数/ %	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	土的相对密度
21.72	42.34	20.56	21.78	1.65	2.73

表 2 棕榈物理性能指标
Tab.2 Palm physical performance indicators

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	800~1 900	5~21

1.2 样品制备和试验方法

首先将特定重量的干土和所需的棕榈纤维混合，再加入相应比率的水混合，搅拌均匀，接着将土壤混合物装入聚乙烯袋中，并在养护缸中保养 24 h 以确保水分平衡。然后，将土壤混合物在具有可拆卸的直径为 39.1 mm、高为 80 mm 的三瓣模中压实，取样。由于随着加筋率的增加，纤维会黏合在一起并结成团，导致土和纤维混合均匀困难，而纤维选取过长则会出现纤维在模具中弯折的情况，因此，加筋率最大选为 0.75%，纤维长度最长选为 30 mm。在文献^[17]中，将含水率范围选为 15%~25%，但在本次试验前期测试准备阶段发现：含水率低于 17% 时，加筋的试样由于含水率太低出现未压先坏的情况；含水率高于 25% 时，土样在模具中击实时容易坍塌，且渗水情况较为严重。故本次试验中将含水率 w 选为 17.72%，19.72%，21.72% 和 23.72%。因此，试验土样在最大干密度和最优含水率上下的状态下选择 3 种不同的纤维长度($L=10, 20, 30$ mm)和 4 种

不同的加筋率($f_c=0, 0.25\%, 0.50\%$ 和 0.75%)来制备。为防止试验误差较大, 每组做 3 个平行试验取平均值, 每组试验系列组合见表 3。

表 3 无侧限抗压强度试验的各系列组合				
Tab.3 Series combinations of unconfined compression tests				
组数	含水率/%	干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	纤维长度/mm	加筋率/%
1	21.72	1.65	10, 20, 30	0, 0.25, 0.50, 0.75
2	17.72, 19.72, 23.72	1.65	20	0, 0.25, 0.50, 0.75

1.3 试验仪器

为排除外界因素的影响, 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测试抗压强度, 仪器主要指标: 位移测量范围为 $0\sim30\text{ mm}$; 测力计量范围为 $0\sim600\text{ N}$; 升降速率为 $2.3\sim2.7\text{ mm/min}$; 外形尺寸为 $235\text{ mm}\times150\text{ mm}\times476\text{ mm}$ 。

2 结果与讨论

2.1 强度特征

2.1.1 加筋率和纤维长度的影响

图 1 给出了在最优含水率 (21.72%) 和最大干密度 (1.65 g/cm^3) 的压实状态下, 长度为 20 mm 的棕榈纤维和不同加筋率组合土样 (第 1 组) 的应力-应变结果。从图中可以看出, 未加筋土的应力突然下降, 这表示素土的脆性。随着棕榈的加入, 未加筋土的脆性逐渐转变为加筋土的塑性。这是由于随着土样上压应力的增加, 棕榈被拉伸导致土壤和棕榈接触面的相互作用, 以及土颗粒与棕榈纤维之间的黏结力和接触面的摩擦力增强, 从而使土的抗压强度增加。因此, 加筋土强度的增加可归因于与土颗粒相互交织的棕榈纤维。从图 1 还可观察到, 加筋土的抗压强度随着加筋率的增加而增加, 加筋率为 0.50% 时达到最大值, 在加筋率为 0.75% 时强度下降。这可能是因为, 当加筋率达到一定值后加入的棕榈纤维已不能较为均匀地分布在土样中, 导致土样中部分土颗粒没有与之形成有效黏结。同时, 过高的加筋率或纤维过长会增大土的孔隙率, 使得土和筋材之间的摩擦力减小。因此, 加入的纤维可能不会完全起作用, 从而导致加筋率为 0.75% 时土样抗压强度下降。

图 2 给出了 (第 1 组) 在最优含水率和最大干密度压实状态下, 加筋率为 0.50% 时, 不同纤维长度对加筋土的应力-应变影响。可以观察到, 随

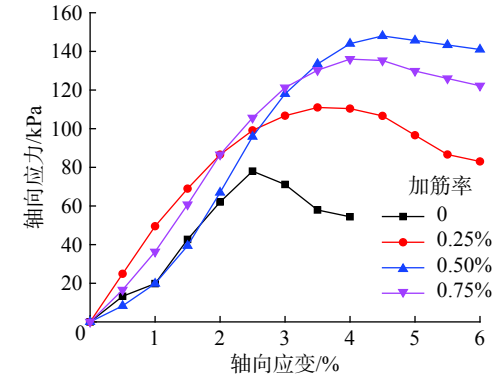


图 1 加筋率对土样应力-应变的影响
Fig. 1 Influence of reinforcement ratio on stress-strain of soil samples

着纤维长度的增加, 抗压强度明显增加。然而, 纤维长度为 20 mm 的土样抗压强度大于纤维长度为 30 mm 的土样, 这说明对于加筋土来说加入的纤维具有最佳纤维长度。在样品制备过程中注意到当加入 30 mm 的棕榈时, 在直径为 39.1 mm 的三瓣模中土样表面存在很多折叠弯曲和裸露在外面的棕榈纤维, 所以加入的 30 mm 棕榈可能没有被充分利用。

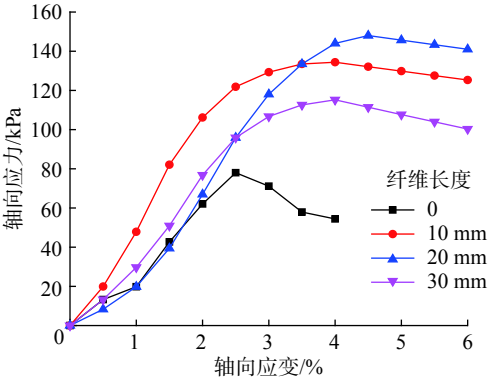


图 2 棕榈纤维长度对土样应力-应变的影响
Fig.2 Influence of palm fiber length on stress-strain of soil samples

从图 3 可以看出: a. 不同棕榈长度与不同加筋率的加筋土呈现相同的趋势, 在纤维长度相同时, 土样的无侧限抗压强度随加筋率增加而增加, 在加筋率为 0.50% 时具有最大强度; b. 在具有相同的加筋率时, 加入 20 mm 纤维的土样具有最大的抗压强度, 而 10 mm 的纤维比 30 mm 的纤维具有更好的增强效果。未加筋土的土样抗压强度为 78 kPa , 加筋率为 0.50% 时, 对于纤维长度 $10, 20, 30\text{ mm}$ 的加筋试样, 抗压强度分别为 $134.40, 148.03, 115.20\text{ kPa}$ 。

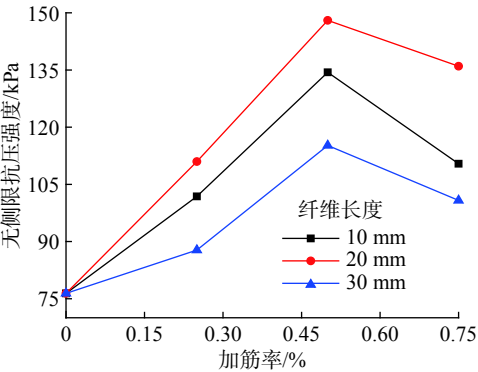


图3 加筋率和纤维长度对土样抗压强度的影响

Fig. 3 Influence of reinforcement ratio and fiber length on the compressive strength of soil samples

2.1.2 含水率的影响

图4给出了在最大干密度(1.65 g/cm³)和长度为20 mm, 加筋率为0.50%时, 在不同的含水率状态下压实的土样(第2组)应力-应变结果。为了比较, 图4中包含了最优含水率(21.72%)时的应力-应变曲线。从图4可以看出, 在最优含水率状态下, 土样的抗压强度最大, 在最佳含水率附近随着水分含量的增加或减小, 加筋土的抗压强度都在降低。这可能是因为含水率在最优含水率以上时, 初期土颗粒之间相互作用较低, 需要更高的变形才能完全黏结并和纤维之间形成更有效的摩擦。在最优含水率以下的情况, 由于水分含量少, 土颗粒之间不能达到很好的黏结而使土体强度不高。

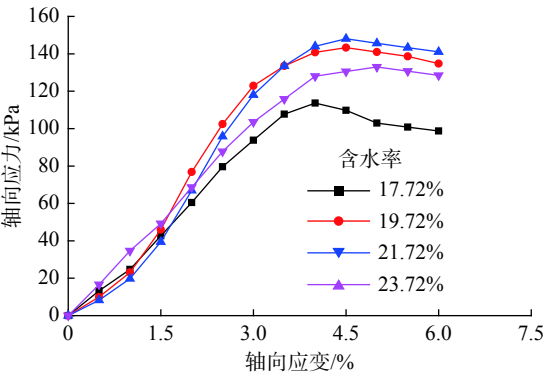


图4 不同含水率下土样的应力-应变关系

Fig. 4 Stress-strain relationship of soil samples under different water contents

图5给出了纤维长度为20 mm时加筋土随含水率的增加抗压强度的变化。结果表明, 不同加筋率的加筋土样具有相同的趋势。随着含水率的增加, 土样抗压强度先增加后降低, 在最优含水率时达到最大值。

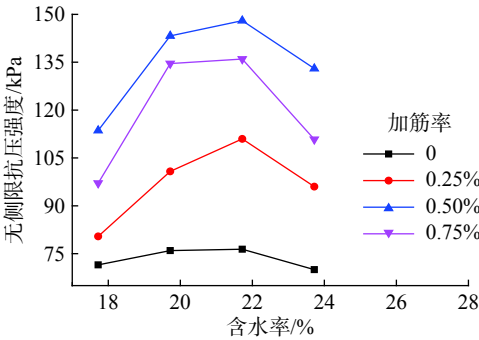


图5 含水率和加筋率对土体抗压强度的影响

Fig. 5 Influence of water content and reinforcement ratio on the compressive strength of soil samples

2.2 变形特性

为了研究加筋土的变形特征, 从第2组应力-应变图的轴向破坏应变研究了非加筋土和加筋土的变形。纤维长度相同时加筋土的轴向破坏应变随着加筋率的增加而增加(图1), 加筋率相同时加筋土的轴向破坏应变随纤维长度的增加而增加(图2), 加筋率和长度相同时随土样含水率的增加而增加(图4), 这些都表明棕榈纤维使土样具有塑性。从图1中可以看出, 在第1组的所有土样中, 加筋率为0.50%, 长为20 mm的棕榈纤维使土样具有最大的抗压强度(148.03 kPa)和相应的破坏轴向应变(4%)。然而, 对于加筋率为0.50%, 长为30 mm棕榈加固的土样(第1组中)最大抗压强度和轴向破坏应变分别为115.20 kPa和4%。这可能是因为较长的棕榈与土壤之间没有较好的相互作用, 使土体在较大的轴向应变下发生破坏。对于未加筋土, 相应的值为78 kPa和2.5%。

在三轴试验中, 如果样品受到远远超过峰值应力的荷载, 则可以获得稳态应力。在无侧限抗压强度试验中, 因为试样不能承受超过峰值应力的任何轴向荷载, 所以难以获得稳态应力。因此, 对于无侧限抗压强度试验, 本文用延展性来研究加筋土样的性能。延展性是加筋土在破坏前变形能力的量度。延性比(DR)计算公式为 $\beta = \frac{\Delta\gamma}{\Delta\mu}$ 。式中: $\Delta\gamma$ 是加筋土样的轴向破坏应变; $\Delta\mu$ 是未加筋土样的轴向破坏应变。第1组和第2组测试所有土样的延性比如图6和图7所示。图6显示了第1组中不同加筋率和加筋长度下土样延性比的变化, 随着加筋率的增加, 延性比连续增加, 并且在3组加筋长度不同的土样中观察到相同的趋势, 在棕榈长为30 mm时获得最大的延性比。在

加筋率分别为 0.25%, 0.50% 和 0.75% 时, 相应的最大延性比分别为 1.6, 1.8 和 2。从图 7 可以看出, 随着含水率的增加, 土样的延性比降低。在含水率相同的条件下, 随着加筋率的增加, 延性比增加, 这说明含水率会降低土样的延性, 加筋率会提高土样的延性。

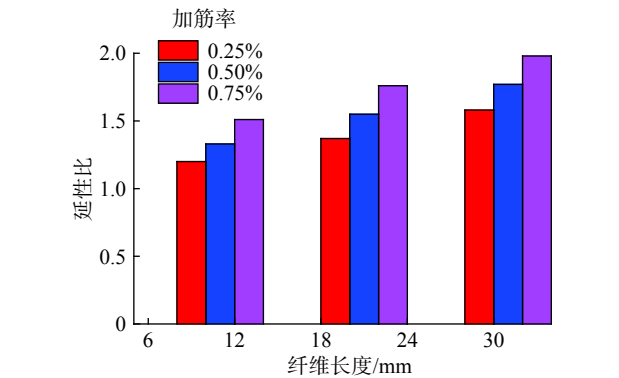


图 6 棕榈纤维长度和加筋率的延性比较

Fig.6 Comparison of the ductility with different palm fiber lengths and reinforcement ratios

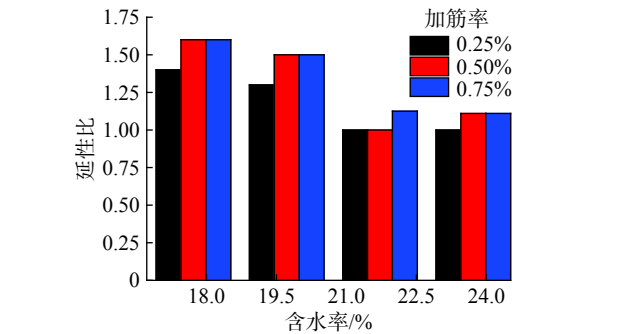


图 7 含水率对加筋土延性比的影响

Fig.7 Effect of water content on the extension ratio of reinforced soil

2.3 正割模量

由于在现场应用中, 实际施加的载荷水平应保持低于峰值抗压强度, 从而不会达到土体破坏轴向应变。因此, 可以用割线模量(即峰值强度与破坏轴向应变的比值)来衡量加筋土的刚度, 本文将未加筋和加筋土样的刚度即正割模量进行了比较。图 8 描述了第 1 组中加筋土的割线模量与加筋率和纤维长度的关系。从图 8 可以看出, 随着加筋率的增加, 土样的正割模量呈现降低趋势, 表明刚度下降, 并且加筋长度不同的 3 组土样有相同的趋势。如图 8 所示, 当加筋率相同时, 棕榈纤维长为 20 mm 时土样的割线模量最大, 其次

是含有长为 30 mm, 长为 10 mm 棕榈纤维的土样, 对于 10 mm 的棕榈, 在加筋率分别为 0.25%, 0.50% 和 0.75% 时, 相应的正割模量分别为 2.90, 2.95, 2.80 MPa, 未加筋土样的正割模量为 3.15 MPa。

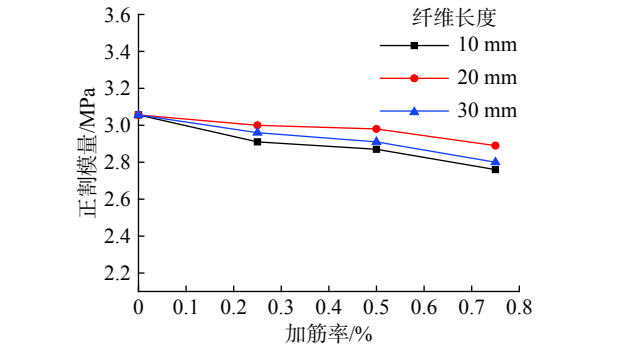


图 8 棕榈纤维长度和加筋率与对土体刚度的影响

Fig.8 Influence of palm fiber length and reinforcement ratio on soil stiffness

图 9 描述了长为 20 mm 的棕榈纤维在不同加筋率条件下(第 2 组)土样刚度随含水率的变化。随着含水率的增加, 正割模量先增加后减少, 割线模量的最大值在最优含水率(21.72%)处, 表明土样在最优含水率时具有最大的刚度。图中可以看出 4 组不同加筋率的试样有相同的趋势。加筋率为 0.50% 时, 4 组不同的含水率(17.72%, 19.72%, 21.72% 和 23.72%)土样的正割模量分别为 6.8, 7.2, 7.4, 6.2 MPa。

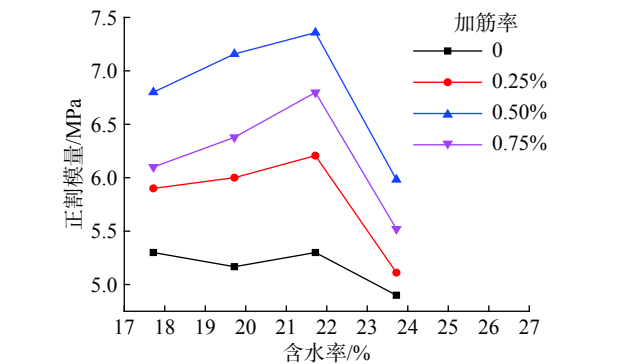


图 9 不同加筋率条件下含水率对土样刚度的影响

Fig.9 Influence of water content on soil sample stiffness under different reinforcement ratio conditions

2.4 能量吸收能力

为了验证棕榈纤维增加了素土的无侧限抗压强度或破坏应变, 本文通过计算应力-应变曲线到失效轴向应变的面积来表示未加筋和加筋土样的能量吸收能力。能量吸收能力的增加表示土样无

侧限抗压强度或破坏应变的增加。[表 4](#)列出了不同加筋率和棕榈纤维长度下(第 1 组)土样的能量吸收能力(EAC)。可以看出,加筋土样的能量吸收能力随加筋率和棕榈纤维长度的提高而提高。这表明,在土样破坏之前,土样中随机分布的纤维使能量能持续吸收。加筋率为 0.50% 时,纤维长度为 30 mm 的加筋土样,无侧限抗压强度为 115.2 kPa,能量吸收能力为 360.90 kJ/m³。然而,纤维长度为 20 mm 的加筋土样(第 1 组),无侧限抗压强度为 148.03 kPa([表 4](#)),能量吸收能力为 349.93 kJ/m³。[表 5](#)中,土样加入长为 20 mm 的棕榈纤维,当加筋率为 0.50% 时,随含水率的增加,土样的能量吸收能力也在增加。因此,土样的能量吸收能力随加筋率和纤维长度的提高而提高,随含水率的增加而增加([表 5](#))。

表 4 不同纤维长度下土样的能量吸收能力
Tab.4 Energy absorption capacity of soil samples with different fiber lengths

L/ mm	无侧限抗压强度/ kPa	破坏应变/ %	能量吸收量/ (kJ·m ⁻³)
0	76.40	2.5	194.84
10	101.85	3.0	221.27
10	134.40	3.5	353.95
10	110.40	4.0	360.87
20	110.98	3.5	245.60
20	148.03	4.0	349.93
20	140.00	4.5	350.25
30	87.75	4.0	250.60
30	115.20	4.5	360.90
30	100.80	5.0	380.40

表 5 不同含水率下土样的能量吸收能力

Tab.5 Energy absorption capacity of soil samples with different water contents

f_c	w/%	无侧限抗强度/kPa	破坏应变/%	能量吸收量/(kJ·m ⁻³)
0	17.72	140.20	2.5	148.95
0	19.72	155.00	3.0	150.55
0	21.72	171.8	3.5	194.84
0	23.72	142.00	4.0	211.14
0.25	17.72	222.00	3.0	229.43
0.25	19.72	240.00	3.5	238.24
0.25	21.72	248.25	4.0	245.60
0.25	23.72	230.00	4.5	275.78
0.50	17.72	255.45	3.5	289.54
0.50	19.72	322.12	4.0	333.47
0.50	21.72	331.11	4.0	349.93
0.50	23.72	299.07	4.5	400.56
0.75	17.72	267.00	4.0	357.77
0.75	19.72	287.00	4.5	362.42
0.75	21.72	305.92	4.5	380.49
0.75	23.72	280.00	5.0	417.85

2.5 破坏形态

2.5.1 加筋率和纤维长度的影响

试验期间和试验之后观察到 2 组土样有不同的破坏形态。[图 10](#)显示了棕榈纤维长为 20 mm 时,不同加筋率条件下土样的典型破坏形态。对于未加筋土样,在加载过程中形成单个主要倾斜破坏面([图 10\(a\)](#)),表明其为脆性破坏。相比之下,加筋率为 0.25%, 0.50% 和 0.75% 时的加筋土样破坏时呈现多个剪切破坏面([图 10\(b\)](#), [\(c\)](#), [\(d\)](#))。

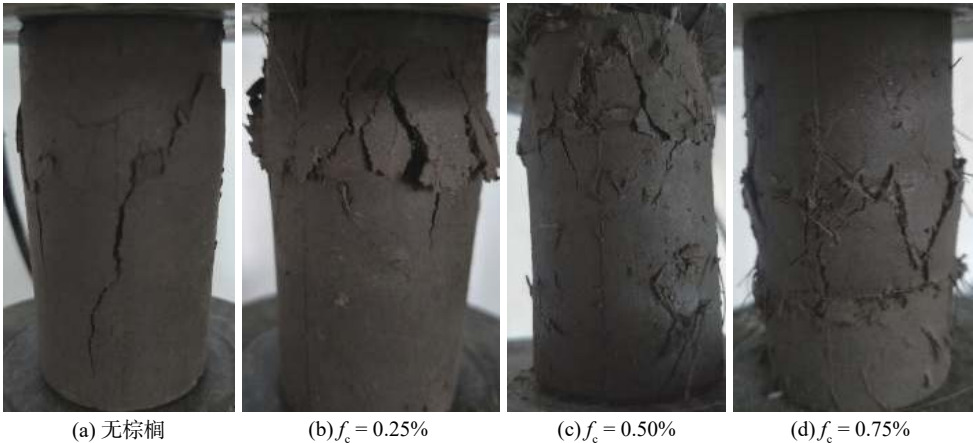


图 10 不同加筋率条件下的破坏模式

Fig.10 Failure modes under different reinforcement ratios

这可能是由于纤维的桥接效应限制了剪切面或裂缝的发展, 导致加筋内的应力再分配, 从而出现多个破坏面。从图 1 的应力-应变曲线可以看出土样在越来越大的轴向应变处发生破坏。图 11 显示 (第 1 组) 与未加筋土样破坏时的单个主要剪切破

坏面 (图 11(a)) 不同, 长度为 10 mm 的加筋土样的破坏包括多个剪切破坏面, 而没有明显的主要破坏面 (图 11(b), (c), (d))。具有不同加筋率和纤维长度 (第 1 组) 的其他加筋土样, 也具有类似的破坏形态。

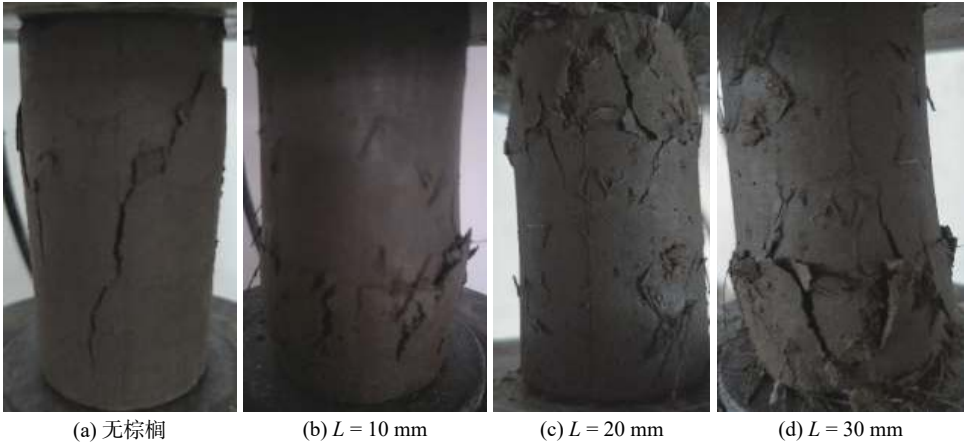


图 11 不同纤维长度条件下的破坏模式
Fig.11 Failure modes under different fiber lengths

2.5.2 含水率的影响

图 12 显示了加筋率为 0.50%, 纤维长度为 20 mm (第 2 组) 的土样, 其含水率对破坏形态的影响。在小于等于最优含水率 (17.72%, 19.72% 和 21.72%) 的条件下, 破坏的土样表面有部分剥落, 存在多个裂纹 (图 12(a), (b) 和 (c))。这是因为在含水率

较低的情况下, 土壤黏聚力较小, 容易受到扰动。当含水率增加到较高含水率 (23.72%) 时, 加筋土样不会发生剥落 (图 12(d)), 土样破坏时有较大变形。这可能是因为含水率较高时, 刚开始土颗粒需要经过较大变形才能形成更加充分有效的黏结。

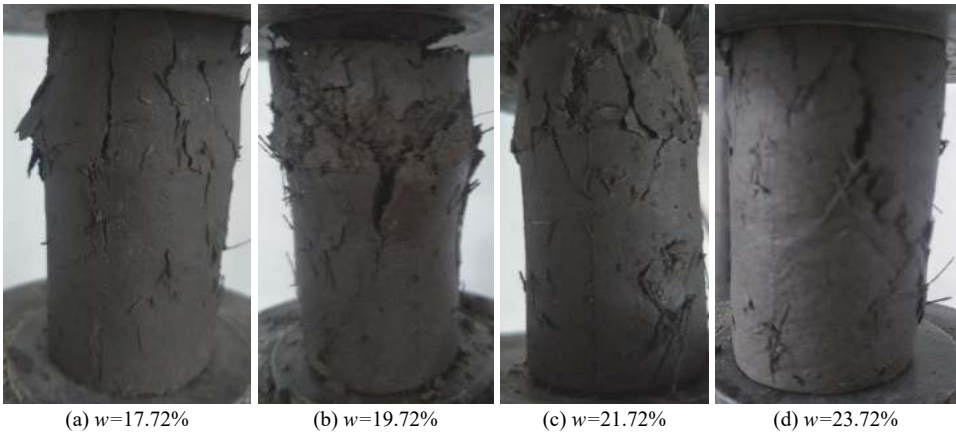


图 12 不同含水率条件下的破坏模式
Fig.12 Failure modes under different water content conditions

3 结 论

将加筋土与未加筋土的无侧限抗压强度试验结果进行比较, 得出以下结论:

- a. 在相同压实状态 (含水率和干密度) 下, 土

样无侧限抗压强度随棕榈纤维的长度或含量的增加而增加。当棕榈纤维长为 20 mm, 加筋率为 0.50% 时, 土样无侧限抗压强度达到最大; 土样抗压强度随含水率的增加而增加, 超过最优含水率后土样抗压强度又降低。

b. 加筋土的轴向破坏应变随着棕榈加筋率、纤维长度以及土的含水率的增加而增加。

c. 在相同压实状态(含水率和干密度)下,土样的割线模量(刚度)随着加筋率的增加而降低;当加筋率、纤维长度相同时,加筋土样的正割模量随着含水率的增加,在最优含水率处达到最大,而后又逐渐减小,表明加筋土的刚度在不断变化。

d. 加筋土的能量吸收能力随加筋率、纤维长度、含水率的增加而增加。

e. 对于未加筋土,其破坏形态是单个剪切破坏面,加筋土的破坏形态有多个剪切破坏面。在小于最优含水率时,加筋土样的破坏形态表现为表面出现多个裂缝,并伴随部分剥落;在大于最优含水率时,表面裂纹消失,并发生相对较大的变形。

值得提出的是,以上结论都是在室内试验条件下得到的,在实际工程中工况多不是理想条件,本试验可以作为一种参考,通过场地的尺寸和深度、土体密度、天然含水率等物理参数,尽量选取合适的加筋率。

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] GHAVAMI K, FILHO R D T, BARBOSA N P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1999, 21(1): 39–48.
- [3] 魏红卫,喻泽红,蔡正银.土工合成材料加筋土抗剪作用的试验研究[J]. *水利学报*, 2005, 36(5): 555–562.
- [4] ADILI A A, AZZAM R, SPAGNOLI G, et al. Strength of soil reinforced with fiber materials (Papyrus)[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2012, 48(6): 241–247.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 李敏,柴寿喜,魏丽.麦秸秆的力学性能及加筋滨海盐渍土的抗压强度研究[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(4): 545–549.
- [8] 杜鹏.加筋条件对稻草加筋盐渍土的无侧限抗压强度影响[J]. *天津城市建设学院学报*, 2012, 18(1): 6–9.
- [9] 闫宁霞,姜宗科.掺纤维固化土强度变化的研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(8): 146–148.
- [10] 丁万寿,雷胜友.含水率对加筋膨胀土强度的影响[J]. *岩土力学*, 2007, 28(2): 391–394.
- [11] 胡展飞,傅艳蓉.基于不同初始含水率的软粘土抗剪强度的试验研究[J]. *上海地质*, 2001(1): 38–42.
- [12] 倪九派,高明,魏朝富,等.干密度和含水率对岩溶地区黄壤抗剪强度的影响——以重庆市南川区木渡河小流域为例[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(1): 82–86.
- [13] 李晓龙.棕榈纤维的基本性能研究[D].重庆:西南大学, 2012: 20–24.
- [14] 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.
- [15] 璩继立,刘宝石,李陈财.棕榈和麦秸秆加筋上海粘土的无侧限抗压强度研究[J]. *土工基础*, 2013, 27(6): 98–101.
- [16] 李陈财,璩继立,李贝贝,等.含水率对麦秸秆加筋土强度影响的试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(6): 203–206.
- [17] 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.
- [18] 璩继立,李贝贝,李陈财,等.棕榈加筋上海黏土强度特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(S2): 142–148.
- [19] 孙中明,璩继立.棕榈加筋土抗剪强度的影响因素分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(5): 203–207.
- [20] 璩继立,赵超男,胡晨凯.复掺纳米 SiO_2 对棕榈纤维加筋土抗剪强度的影响[J]. *上海理工大学学报*, 2017, 39(5): 497–504.

(编辑:丁红艺)