

DOI: 10.11779/CJGE202104009

纤维加筋土坯的蒸发过程及抗拉强度特性

荣德政, 唐朝生*, 曾 浩, 程 青, 李昊达, 施 磊

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 土坯作为一种生态、低碳和环保的建筑材料, 其力学性能是学界和工程技术人员关注的重点。为了提高土坯的综合抗拉特性, 提出采用纤维加筋技术对土坯进行改性处理。通过模拟土坯的形成过程, 制备了一系列不同纤维掺量(0~0.2%)、初始含水率(16.5%~20.5%)和干密度(1.50~1.70 g/cm³)的压实土坯试样, 进行自然干燥处理, 并对干燥后的土坯试样开展了一系列劈裂试验, 重点分析了纤维掺量和初始压实状态对土坯干燥失水过程及抗拉强度的影响。结果表明: ①纤维加筋对土坯的干燥失水过程没有明显影响, 但加筋土坯的残余含水率随纤维掺量呈“先降后升”趋势; ②纤维加筋能显著提高土坯的抗拉强度, 但其对抗拉强度的贡献随掺量的增加呈“先升后缓”趋势, 对南京地区的下蜀土而言, 其最优纤维掺量为0.1%, 且纤维加筋能有效抑制土坯的脆性破坏模式, 改善土坯的残余抗拉强度和韧性; ③提高土坯制作时的初始含水率和初始干密度对改善土坯的抗拉强度和纤维加筋效果有较好的正面作用; ④纤-土界面的微观力学作用及纤维的“桥梁”作用是控制纤维加筋土坯综合抗拉特性的关键因素。

关键词: 土坯; 纤维加筋土; 干燥蒸发; 抗拉强度; 含水率; 干密度

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)04-0670-09

作者简介: 荣德政(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程地质与环境岩土工程研究。E-mail: rongdezheng@mail.nju.edu.cn。

Evaporation process and tensile behavior of fiber-reinforced rammed earth

RONG De-zheng, TANG Chao-sheng, ZENG Hao, CHENG Qing, LI Hao-da, SHI Bin

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The rammed earth is an environmental-friendly building material. Its mechanical properties draw lots of attention among researchers and engineers in recent years. In order to improve the tensile performance of the rammed earth, the fiber-reinforcement is applied to better modify its properties. A series of compacted rammed earth samples with different fiber contents (0~0.2%), initial water contents (16.5%~20.5%) and dry densities (1.5~1.7 g/cm³) are prepared by simulating the natural air-drying process of rammed earthmaking. The splitting tensile tests are carried out on the air-dried rammed earth samples. The effects of fiber content and initial state on the evaporation process and tensile strength of rammed earth are analyzed. The results show that: (1) The fiber content has few influences on the evaporation rate of the reinforced rammed earth. But with the increase of the fiber content, the residual moisture content of the reinforced rammed earth decreases first and then increases. (2) The fiber inclusion can significantly improve the tensile strength of the rammed earth, but the contribution of fiber reinforcement to strength increment will be reduced beyond a certain fiber content. The optimum fiber content for Xiashu soil in Nanjing area is observed at 0.1%. The fiber inclusion can also modify the brittle failure mode of the rammed earth to ductile one so as to improve the residual tensile strength and toughness of the rammed earth. (3) Increase of the initial water content and the initial dry density can significantly improve the tensile strength and the fiber reinforcement benefit. (4) The micromechanical interaction of the fiber-soil interface and the "bridging" effect of the fiber are the key factors controlling the overall tensile behavior of the fiber-reinforced rammed earth.

Key words: rammed earth; fiber-reinforced soil; drying evaporation; tensile strength; water content; dry density

0 引言

土坯是一种历史悠久的建筑材料。土坯的原材料分布广泛, 易于获取, 土坯的制作工艺简单, 无需焙烧, 方便快捷。因此, 同混凝土、烧制砖等建筑材料相比, 土坯具有低成本、低排放、绿色、节能环保的

优点。目前世界上有许多国家和地区的房屋和基础设施都是采用土坯进行建造, 如欧洲、非洲、中东、东南亚和中国西北、西南、东南地区等^[1]。随着可持续

收稿日期: 2020-06-17

*通信作者 (E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn)

发展、节能减排、绿色环保等建造理念在全球范围内的不断推进, 土坯作为一种原生态的建筑材料在学界和工程界均引起了广泛关注, 尤其在一些发达国家和地区, 土坯建筑正受到越来越多人们的青睐, 推广迅速^[2]。当前中国正在大力推进资源节约型和环境友好型社会, 大力发展绿色建筑, 如何更科学地利用土坯材料和开发新型土坯建筑产品, 指导工程实践, 从而使这一古老建筑工艺呈现新的生命力, 有必要围绕该课题开展深入的基础研究。

国内外学者在土坯的力学性能方面已经取得了一些研究成果^[3-6]。如 Jaqun 等^[7]在控制吸力条件下开展了三轴试验, 指出吸力是影响夯土土坯强度的主要参数; Bui 等^[8]测试了土坯干燥过程中的抗压强度, 发现当土坯含水率低于 4%时, 其强度几乎不受含水率影响; Beckett 等^[9]通过开展无侧限抗压强度试验, 研究了不同初始含水率对压实水泥固化土坯力学特性的影响, 发现在略低于最优含水率下压实时, 水泥对土坯的加固效果最好; El-Nabouche 等^[10]通过开展大尺度直剪试验, 发现分层击实的土坯墙层间剪切强度能维持较高的水平, 达到非层间强度的 78%~91%; 然而, 以往关于土坯力学特性的研究主要局限于抗压强度, 抗拉特性的研究相对较少。在实际工程中, 土坯墙根部在地震、强风等水平荷载条件下常会发生张拉破坏, 在干湿气候循环作用下土坯表面也易发育干缩裂隙, 在本质上也是一种张拉破坏形式, 会对构筑物的稳定性产生负面影响^[11]。因此, 如何提高土坯的抗拉强度是该领域的一个重要研究课题。

近些年来, 一种通过向土体中加入离散短丝纤维的加筋技术逐渐兴起, 为改善土坯的力学性能提供了新的思路。纤维加筋是一种物理作用, 不会改变土体的基本化学性质和原始结构, 是一种绿色改性技术。研究人员近年来围绕纤维加筋土的工程性质开展了大量研究^[12-15]。Consoli 等^[16]通过开展无侧限抗压强度试验, 研究了水泥固化剂对纤维加筋土力学特性的影响, 发现即使少量水泥的掺入也能极大提高纤维加筋土的强度。王德银等^[17]通过开展直剪试验, 研究了纤维加筋非饱和土的剪切特性, 指出相对于内摩擦角, 纤维对土体黏聚力的增强效果要明显得多。Tang 等^[18-19]通过开展一系列拉拔试验, 并利用扫描电镜技术对纤维加筋与土的微观作用机制进行了研究, 指出纤维加筋的机理在于纤维和土颗粒之间的界面力学作用(黏结和摩擦)能激发纤维的拉筋效果和对土体变形的约束能力。尽管纤维加筋技术具有较好增强效果, 但以往研究主要局限于相对较高含水率状态下的土样。而土坯在制作过程中需要将其风干, 纤维的掺入是否会影响土坯干燥过程中的蒸发特性? 抗拉特性如何? 目前学界尚未见相关报道。

为此, 本文提出采用纤维加筋来提高土坯的抗拉强度。通过开展一系列蒸发试验及劈裂试验, 重点研究了不同纤维掺量、初始含水率和压实干密度对纤维加筋土坯蒸发过程及抗拉强度的影响规律, 探讨了纤维加筋对土坯的增强机理。研究结果对优化土坯制作工艺及指导工程应用有一定意义。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验所用土样为取自南京地区的下蜀土, 其基本物理性质如表 1 所示。试验中所采用的纤维为聚丙烯纤维, 长度约 12 mm, 其物理力学参数见表 2。

表 1 南京地区下蜀土基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of Xiashu soil in Nanjing area

相对质量 密度 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指 I_p	最大干密度 $\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$	最优含水率 $w_{opt}/\%$
2.71	34.5	18.4	17	1.70	16.5

表 2 聚丙烯纤维基本物理力学性质

Table 2 Physical and mechanical properties of polypropylene fiber

密度 $/(g\cdot cm^{-3})$	直径 $/mm$	长度 $/mm$	抗拉强度 $/MPa$	弹性模量 $/MPa$	熔点 $/{ }^{\circ}C$	燃点 $/{ }^{\circ}C$
0.91	0.048	12	≥ 350	≥ 3500	165	590

1.2 试样制备

将取回后的土样风干碾碎, 过 2 mm 筛。随后烘干, 按特定的纤维掺量(纤维质量占干土质量的百分比)在干土中混入聚丙烯纤维, 并充分搅拌至纤维-干土混合物中纤维团聚体完全散开, 此时可将纤维视为在土中均匀分布。

为了探究纤维掺量对土坯力学性质等的影响, 本文共设计了 5 种不同的纤维掺量, 分别为 0.0, 0.05%, 0.10%, 0.15% 及 0.2%。在上述纤维-干土混合物中再分别加入适量的水, 配置成 3 种不同的初始含水率(16.5%, 18.5% 和 20.5%), 然后密封静置, 以便土样内部水分分布均匀。在此之后, 称取适量纤维/土混合物置于直径为 61.8 mm 高度为 20 mm 的环刀中, 利用液压机将混合物分别压制到 1.50, 1.60 及 1.70 g/cm³ 的干密度。

本次研究共开展了 9 组试验, 对应的纤维掺量、初试含水率和干密度如表 3 所示。此外, 为了降低试验误差, 每组试样按照同样的试验方法制备了 4 个平行样。

1.3 试验方法

(1) 风干过程

将所有制备好的试样置于恒定 30℃±2℃ 的空调房间内进行风干, 房间的相对湿度为 45%±3% (对应吸力约 110±10 MPa), 模拟土坯的干燥过程。为了研究土样在干燥过程中的水分蒸发特性, 本文利用电子天平(精度 0.01 g)对试样进行定时称重, 基于获得的质量数据计算出试样的含水率变化。为了消除环境条件波动对蒸发速率的影响, 干燥过程中同时设置

了一组纯水试样作为蒸发参照样^[20], 并用相对蒸发速率 E_a/E_p (E_a 为试样水分蒸发速率, E_p 为纯水蒸发速率) 来描述试样的蒸发过程。当各组试样在 48 h 内重量变化小于 0.1 g 时, 视试样达到风干状态, 干燥结束。

表 3 各组试样的参数

Table 3 Parameters of different sets of samples

试样编号	纤维掺量 /%	初始含水率 /%	压实干密度 /(g·cm ⁻³)
T1	0	16.5	1.70
T2	0.05	16.5	1.70
T3	0.10	16.5	1.70
T4	0.15	16.5	1.70
T5,S1	0.20	16.5	1.70
S2	0.20	18.5	1.70
S3,G1	0.20	20.5	1.70
G2	0.20	20.5	1.60
G3	0.20	20.5	1.50

(2) 抗拉强度测试

为了获得土坯试样的抗拉强度, 对前述的风干土样开展了一系列巴西劈裂试验。试样试验前后图片及试样受力示意图分别如图 1 (a), (b) 所示。进行加载后, 当试样发生变形满足 $\frac{a}{h} < \epsilon$ 时 (a, h 分别对应试样横向及纵向变形, 如图 1 (c) 所示), 对应试样的抗拉强度可由如下公式得到^[21]

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi D t} \quad . \quad (1)$$

式中 σ_t 试样抗拉强度; P 为施加的劈裂荷载峰值; D 为试样直径; t 为试样厚度。该方法的具体细节及力学原理可参见文献[21]。试验过程中控制竖向加载速率为 1 mm/min, 当试样发生破坏或者竖向应变达到 6% 时结束试验, 并进一步测试了试样的残余含水率。

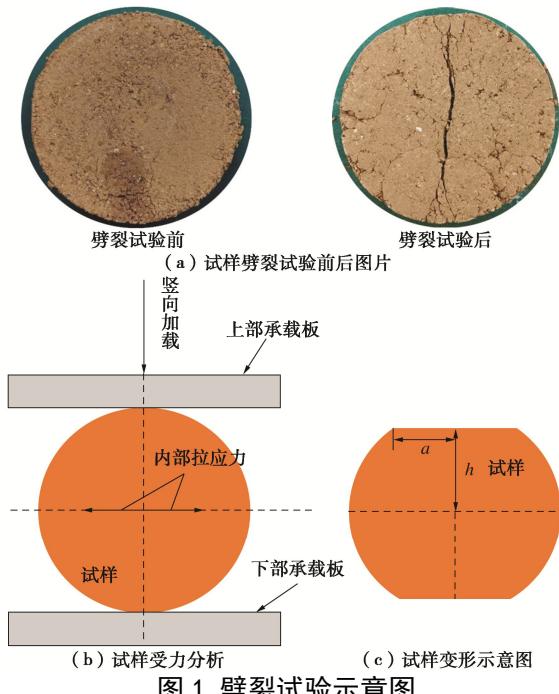


图 1 劈裂试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of split tensile tests

2 试验结果

2.1 土坯蒸发过程

(1) 纤维掺量的影响

图 2 和图 3 分别给出了不同纤维掺量试样 T1~T5 (表 3) 在干燥过程中的平均含水率和相对蒸发速率变化曲线。从图 3 中可以看出, 各组试样蒸发失水过程趋于一致, 几乎不受纤维掺量的影响。此外, 在干燥初期, 含水率随时间线性减小, 试样的含水率下降和时间表现出一定线性关系。随着干燥的持续, 含水率的变化逐渐减小, 变化趋势由直线型过渡为曲线型, 并最终达到稳定。

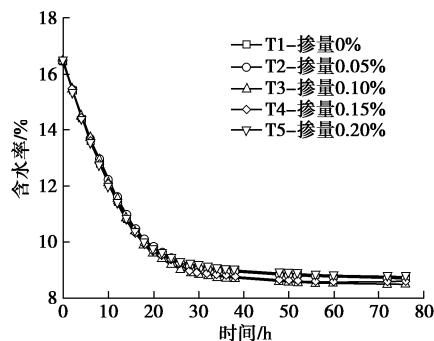


图 2 不同纤维掺量试样平均含水率随时间变化

Fig. 2 Variation of average water content versus time for samples with different fiber contents

从各组试样的蒸发曲线来看(图 3), 在试验开始后, 压实土样的蒸发速率随着时间的推移不断降低并最终降至 0。类似地, 各组试样的蒸发速率也几乎不受纤维掺量的影响, 变化趋势基本一致。由此可见, 在土坯中加入纤维不会明显改变干燥失水过程。

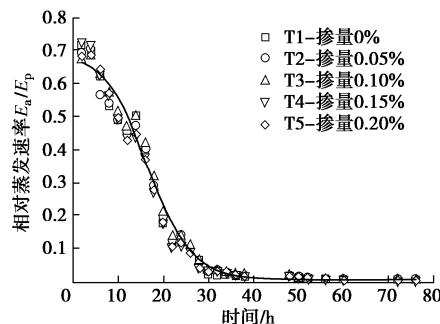


图 3 不同纤维掺量试样相对蒸发速率随时间变化

Fig. 3 Variation of relative evaporation rate (E_a/E_p) versus time for samples with different fiber contents

当试样 T1~T5 蒸发结束后, 测定了其残余含水率, 结果如图 5 所示。从图中可以看出, 试样的残余含水率总体上差别不大, 在 8.5%~8.9% 范围内波动, 其随着纤维掺量的增加呈现出先降低后升高的变化趋势。对于纤维掺量在 0~0.2% 之间的 5 组试样来讲,

在纤维掺量为 0.1% 时, 其对应土坯的残余含水率最低, 为 8.5%。有研究表明^[7], 土坯强度的主要来源是其干燥过程中随含水率降低内部不断增加的吸力。尤其在含水率较低, 接近风干时, 土坯含水率的轻微变化能显著改变土体的吸力。因此土坯干燥越彻底, 残余含水率越低, 理论上越能达到更高的力学强度。但对于纤维加筋土坯, 其力学性质受含水率和纤维掺量的共同控制, 最优纤维掺量应结合后续的力学性质加以综合考虑。

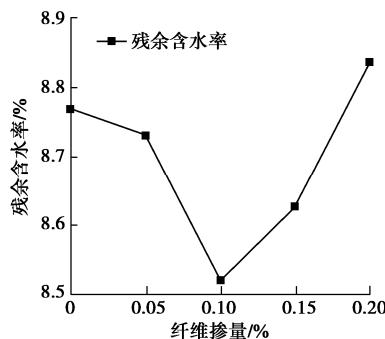


图 4 不同纤维掺量试样残余含水率

Fig. 4 Residual water contents of samples with different fiber contents

(2) 初始含水率的影响

图 5 (a) 给出了不同初始含水率试样 S1~S3 (表 3) 在干燥过程中的含水率变化曲线。由图中可以看出, 由于初始含水率不同, 3 组含水率变化曲线表现出明显差异, 近乎平行排布, 然而 3 组试样的失水过程与前文所述相似, 含水率的变化趋势并无太大差别, 基本由最初的直线型过渡到曲线型, 并最终达到稳定。

从图 5 (a) 中还可以看出, 试样 S1~S3 的残余含水率随初始含水率的增加而增加。如初始含水率分别为 16.5%, 18.5% 和 20.5% 时, 对应的残余含水率分别为 8.8%, 9.4% 和 11.0%。由于初始含水率的差异会导致压实过程中的土体结构发生变化, 这是造成土坯残余含水率产生差异的主要原因, 具体将在后文中进行解释。

虽然 3 组试样在含水率变化趋势上相差不大, 但蒸发特性呈现出一定差异 (图 5 (b)), 对应的初始相对蒸发速率分别为 0.68, 0.72 和 0.76, 即初始含水率越高, 蒸发速率越大。随着干燥蒸发的进行, 3 组试样的蒸发速率差异不断减小, 逐渐趋于同一量值, 并最终全部降至 0。

为了进一步分析含水率与相对蒸发速率的关系, 将相关结果绘制于图 5 (c) 中。可以看出, 试样的相对蒸发速率随含水率的变化可分为两个阶段: 缓慢减小阶段 I 和快速减小阶段 II。在缓慢减少阶段, 3 组

试样的蒸发路径基本重合, 主要是因为蒸发早期试样的含水率相对较高, 此时蒸发速率主要受含水率控制。随着干燥的持续, 3 组试样的蒸发速率分别沿不同的路径进入快速减小阶段, 且转折点对应的含水率随试样初始含水率的增加而增加, 这主要也与初始含水率不同导致的土结构及持水能力差异有关^[20]。由此可见, 在不同蒸发阶段, 试样含水率和土结构的支配作用也不同。

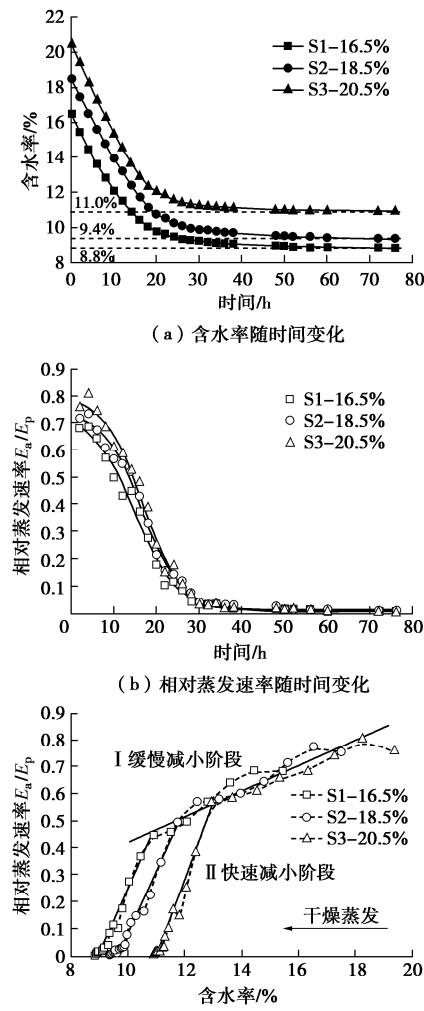


图 5 不同初始含水率试样蒸发过程

Fig. 5 Evaporation process of samples with different initial water contents

(3) 初始干密度对蒸发过程的影响

图 6 (a) 展示了不同初始干密度试样 G1~G3 (表 3) 在干燥过程中含水率的变化曲线。从图中可以看出, 就单个试样而言, 其干燥失水趋势与前文所述基本一致, 然而对比 3 组试样, 干燥蒸发开始后含水率的变化呈现明显差异。总体上, 含水率线性减小段对应的斜率随初始干密度的增加而减小。干燥结束后, 试样初始干密度越小, 对应的最终残余含水率也越低。图 6 (b) 的结果表明, 初始干密度越小的试样对应的相

对蒸发速率越高。如试样 G1、G2 和 G3 的初始相对蒸发速率分别为 0.76, 0.81 和 0.85。

干燥结束后, 测得 3 组试样的残余含水率分别为 10.9 (G1)、8.4 (G2) 和 7.9% (G3), 随初始干密度的增加而增加 (图 6 (a)), 这也与初始干密度不同导致的土结构差异有关, 后文将对此加以解释。

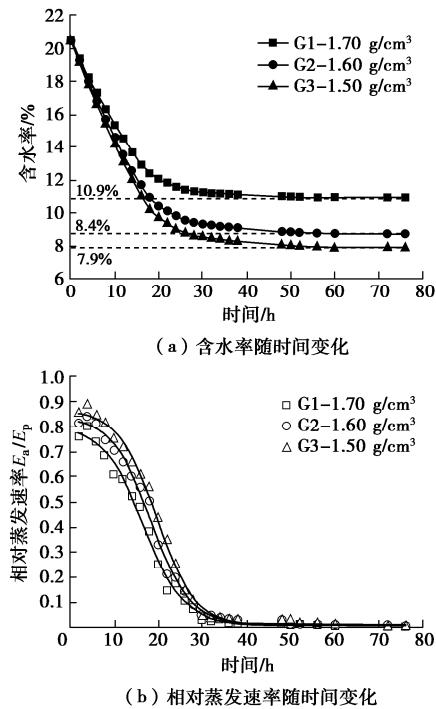


图 6 不同初始干密度试样蒸发过程

Fig. 6 Evaporation process of samples with different initial dry densities

2.2 土坯抗拉强度

(1) 纤维掺量对土坯抗拉特性的影响

图 7 (a) 给出了 5 组不同纤维掺量土坯试样的典型劈裂试验曲线。从图中可以看出, 试验曲线总体上呈现三阶段特征: ①在试验开始阶段, 劈裂应力随应变单调递增; ②劈裂应力达到峰值后出现急剧跌落, 存在明显的峰值应力损失; ③随着应变的进一步增加, 残余劈裂应力最终趋于近似稳定值。当纤维掺量小于 0.1% 时, 峰值应力损失总体较大, 而当纤维掺量大于 0.1% 后, 试样劈裂破坏时峰值应力损失明显减小, 破坏模式由脆性破坏逐渐向韧性破坏转变, 尤其对于纤维掺量为 0.2% 的试样, 劈裂应力在破坏后只有轻微的减小。

根据曲线的峰值劈裂应力、残余劈裂应力及式 (1), 分别计算了各组试样的抗拉强度及残余抗拉强度, 结果如图 7 (d) 所示。在 0 到 0.1% 的纤维掺量范围内, 土坯的抗拉强度出现了随掺量的增加而升高的趋势, 而当纤维掺量超过 0.1% 后, 多加入的纤维对

抗拉强度的贡献不明显, 土坯抗拉强度变化趋于平缓。比如当纤维掺量在 0 到 0.1% 之间时, 每掺入 0.05% 的纤维, 土坯的抗拉强度平均能提升 15.5%。然而, 当纤维掺量大于 0.1% 后, 其抗拉强度并未出现明显提升, 甚至当纤维掺量从 0.1% 增加到 0.15% 时, 土坯的抗拉强度反而有略微降低。对于残余抗拉强度而言, 总体上随纤维掺量的增加呈现线性增大的趋势。

综上可知, 在土坯中加入纤维, 不仅仅能显著提高抗拉强度, 更能减弱土坯的脆性破坏模式, 减缓破坏过程中峰值强度的损失。因此, 如果仅仅从提高强度和降低成本出发, 基于本文的试验结果, 0.1% 的纤维掺量可视为最佳。但根据文献资料, 纤维掺量对力学强度的贡献并不是越高越好, 最佳纤维掺量通常在 0.1%~0.3% 范围内^[22]。

(2) 初始含水率对土坯抗拉特性的影响

图 7 (b) 展示了 3 组不同初始含水率土坯的典型劈裂试验曲线。从图中可以发现, 试验曲线同上文所述, 也呈现三阶段特征。初始含水率越高的试样, 曲线上升段的斜率越大, 即试样的刚度越大, 试样的破坏形式越趋近于脆性破坏。如当初始含水率为 16.5% 的试样发生破坏时, 其强度随应变缓慢减小, 且峰值抗拉强度与残余抗拉强度之差较小。而对初始含水率为 20.5% 的试样而言, 当发生劈裂破坏时, 其强度迅速跌落, 峰值抗拉强度损失比较显著。总体上, 残余抗拉强度随初始含水率也呈递增趋势, 但增幅不如峰值抗拉强度明显。

图 7 (c) 给出了 3 组试样抗拉强度及残余抗拉强度。在纤维掺量均为 0.2% 时, 初始含水率为 16.5%, 18.5% 和 20.5% 的试样平均抗拉强度分别为 258.2, 305.8 和 437.5 kPa。可以看出, 试样的抗拉强度随初始含水率的增加而提高, 呈指数增长趋势。比如, 当初始含水率从 16.5% 提高到 18.5%, 试样抗拉强度提升了 18.4%。而当含水率从 18.5% 提高到 20.5%, 试样抗拉强度则提升了 43.1%。初始含水率越高, 对抗拉强度的贡献越明显。对于残余抗拉强度而言, 总体上也呈现随初始含水率增加而提高的趋势, 但增幅呈下降趋势。

(3) 初始干密度对土坯抗拉特性的影响

图 7 (d) 给出的是 3 组不同初始干密度试样的典型劈裂试验曲线。从图中可以看出, 在干密度为 1.7 g/cm³ 时, 其曲线上升段相对较陡, 破坏瞬时的峰值强度损失较大, 试样表现出明显的脆性。而对于干密度为 1.5, 1.6 g/cm³ 的试样, 其曲线上升段斜率相对较缓, 发生破坏的瞬间峰值抗拉强度损失较小。

3 组试样的抗拉强度及残余抗拉强度结果如图 7

(f) 所示。初始干密度为 1.50, 1.60 和 1.70 g/cm³ 的试样平均抗拉强度分别为 222.2, 254.8 和 437.5 kPa。试样抗拉强度随初始干密度的增大而提高。此外, 从曲线的变化趋势得知, 随着初始干密度的增大, 试样抗拉强度的增幅也越大。如试样 G1~G3 中, 当干密度从 1.50 g/cm³ 增加大到 1.60 g/cm³ 时, 抗拉强度提高了 19.2%, 而当干密度从 1.60 g/cm³ 增大到 1.70 g/cm³ 时, 抗拉强度则提高了 65.2%, 增幅显著。此外, 从图 7 (f) 中也可以看出, 试样破坏后的残余抗拉强度也随着初始干密度的增加而明显升高。

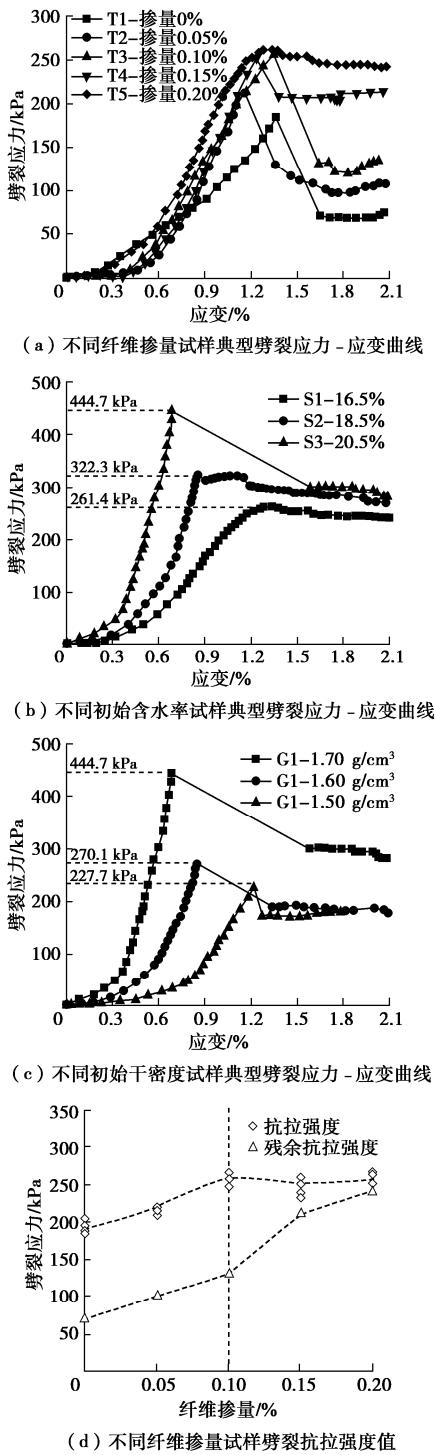


图 7 劈裂试验结果

Fig. 7 Results of split tensile tests

3 讨 论

3.1 纤维加筋土坯蒸发过程的影响因素

通常情况下, 土中水分的持续蒸发需要满足 3 个条件^[23]: ①土体表面有持续的热量供应; ②大气中蒸汽压低于土体表面附近蒸汽压; ③体内部有持续的水分供应到蒸发面。由此可见, 影响初始为非饱和状态的土坯干燥蒸发的因素很多, 例如环境因素、试样初始条件等。本文主要针对纤维掺量、初始含水率及初始干密度 3 个因素进行分析。

纤维作为一种改良土坯力学性质的添加物, 对其干燥失水过程的影响相对较小。然而, 土坯的残余含水率却呈现出随纤维掺量先减小后增加的趋势(图 1~3)。这是由于当纤维掺量较少时(0~0.1%), 纤维能在土坯压实过程中相对均匀分布, 形成相互交织的三维网络, 为水分迁移提供潜在的通道, 进而促进土坯中水分传导至蒸发面进行蒸发, 使得土坯中水分减少, 残余含水率降低。Miller 等^[24]的研究结果表明, 纤维的加入能显著提高土体的渗透系数。但随着纤维掺量的进一步增加(大于 0.1%), 试样的残余含水率呈现增加趋势, 这可能有以下几个方面的原因: ①过多的纤维会在土坯中发生相互纠缠, 产生团聚现象^[25], 水分得以储存于相互纠缠的纤维中; ②纤维本身是一种不透水材料, 成团后易在试样中形成阻水屏障, 对水分迁移和蒸发产生负面影响; ③当掺量进一步增加,

纤维与土坯有更多接触，土颗粒与纤维、纤维与纤维之间可能形成更多的储水夹角和细小孔隙，从而提升土坯的持水能力。但这些还需要后续更精细的试验结果加以论证。

除纤维的掺入以外，土坯自身的初始含水率与初始干密度也是影响其蒸发特性的重要因素。对于不同初始含水率的土坯，其蒸发速率及残余含水率随初始含水率的提高而提高（图 5）。前者的提高主要是由于蒸发开始阶段，高初始含水率的土坯内部的吸力水平相对较低，因此土-气界面之间存在较大的蒸汽压梯度，从而在一开始就能保持较高的蒸发速率。此外，含水率越高，可供蒸发的水分越多，这对提高蒸发速率也有积极作用。

对于残余含水率而言，其在本质上反映了特定干燥环境条件下土体的持水能力。由于本次试验各组试样都是在相同的环境条件下干燥，理论上残余含水率应该一致，然而实测结果并非如此，这些现象都可以从土体结构方面进行解释。有研究表明^[25]，土体压实时含水率越低，越呈现团聚体结构，内部存在较多的大孔隙（团聚间孔隙）。随着含水率增加，团聚体逐渐分散，土样压实后越趋近于均匀的基质状结构，孔隙相对较小，且孔径分布均匀。因此，初始含水率较高的土坯拥有更加细小的孔隙和更高的持水能力，蒸发快要结束时能表现出更高的吸力水平，在降低土坯表面蒸汽压、抑制蒸发的同时，也阻碍了水分子的迁移和逃逸，从而提高了其残余含水率。类似地，由于初始干密度的增加也能使得土坯中大孔隙减小，小孔隙增多，因此随着初始干密度的增加，土坯持水能力也会增强，其蒸发速率降低，残余含水率升高^[20]。

3.2 纤维加筋土坯抗拉强度的影响因素

纤维加筋对土坯抗拉强度的贡献主要取决于纤维表面同土颗粒之间的黏结和摩擦作用^[19]。当土坯含水率较高时，孔隙间存在较多水分，其润滑作用会降低纤维-土界面作用力，削弱纤维加筋效果^[17]。将制作好的土坯样进行干燥后，土体发生收缩，一方面纤维会随土体收缩变形发生进一步弯曲，另一方面孔隙水的润滑作用逐渐减弱，纤维-土界面作用力不断增强。当土样在外力作用下发生变形时，纤维的抗拔出能力和产生的“锚固”效应也更加明显，从而赋予了纤维加筋土坯较高的抗拉强度（图 8 和图 10）。

通常，适当增加土中的纤维掺量可以增加单位体积内纤维的数量，从而提升纤维的加筋效果。在前文的分析中，当纤维掺量小于 0.1% 时，土坯的抗拉强度随掺量的增加而增大。这主要是由于纤维掺量较低时，纤维趋向于均匀分布，土颗粒和纤维能够充分接触。试样内部一旦出现拉应力，便会激发纤维和土颗粒间

的黏结和摩擦作用。因此，纤维自身的拉筋效果和抗拉强度能够充分发挥，从而提升了土坯的抗拉强度。然而，纤维掺量并不是越高越好。如纤维掺量大于 0.1% 后，便难以进一步提高土坯的抗拉强度（图 7）。这主要是因为过多的纤维易相互缠绕并产生成团现象^[26]，在土坯中形成软弱结构面，限制了抗拉强度的进一步提升。Millogo 等^[27]在研究红麻纤维加筋土时，发现土样抗压强度也会随纤维掺量的变化出现峰值现象。

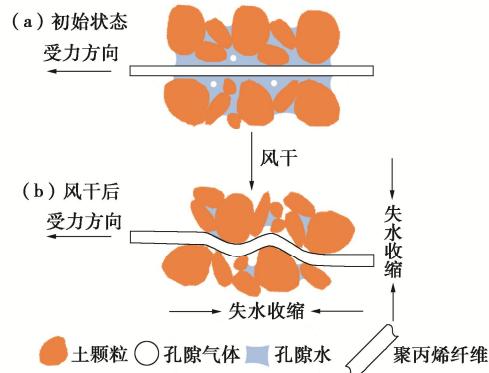


图 8 纤-土界面作用示意图

Fig. 8 Schematic diagram of interfacial mechanical interaction between soil particles and fiber

如前文所述，当土坯的初始含水率及初始干密度发生改变时，土样的微观结构会相应发生改变，这也会影响纤维的加筋效果产生重要影响。Tang 等^[28]在研究中指出，纤维-土界面的作用力大小与界面接触条件尤其是有效接触面积密切相关。初始含水率的升高使土坯在压实后内部结构由团聚体结构向基质结构转变^[25]，相比较而言，干燥后更加致密均匀，纤维-土有效接触点数量和面积均会增大（图 9），纤维能抵抗更大的拉应力，加筋效果得到改善。除此之外，均匀基质结构的土样单位体积内的颗粒联结数量比团聚体结构土样多，拉断需要克服土颗粒间的作用力也因此增加。这解释了图 7 (b) 和图 7 (e) 中土坯的抗拉强度随初始含水率的增加而增加的现象。

初始干密度的差异直接影响了土颗粒和纤维界面的接触状态。干密度越高，土颗粒与土颗粒之间、纤维与土颗粒之间的有效接触面积越大，土坯干燥后纤维与土颗粒之间的咬合更密切，纤维加筋的效果更好。Tang 等^[19]通过开展单根纤维拉拔试验也证实了上述观点，即纤-土界面剪切强度随干密度的增加而增加。此外，由于压实干密度越高的土坯在同等条件下吸力水平也越高，其对土坯强度的贡献也越大。因此，提高初始干密度能够有效增加纤维加筋土坯的抗拉强度（图 7 (c), (f)）。

3.3 纤维加筋土坯劈裂破坏特征

纤维加筋在提高土坯抗拉强度的同时，还能够显著降低土坯破坏时的脆性，这对提高土坯结构的整体

稳定性和安全性具有重要意义。这主要是因为纤维加筋土坯破坏后, 破坏面上的纤维并不会被瞬间拔出或拉断, 纤维能够像“桥梁”一样连接破坏面的两边, 使土样呈现“裂而不断”的现象, 继续承担拉应力, 从而起到抑制裂隙发展的作用(图10)。该“桥梁”作用与破坏面上的纤维数量有关, 纤维掺量越高, 则单位破坏面上纤维数量越多, 因此加筋土坯的残余抗拉强度与纤维掺量呈现较好的正相关关系。此外, “桥梁”作用也与纤维-土界面作用力大小有关, 界面作用力越大, 纤维的抗拔能力和承担拉应力的能力越强, 对裂隙的抑制效果越佳。只有当拉应力超过纤维-土界面剪切强度或者纤维自身的抗拉强度时, 断面上的纤维会被拔出或者被拉断, 从而丧失加筋效果。

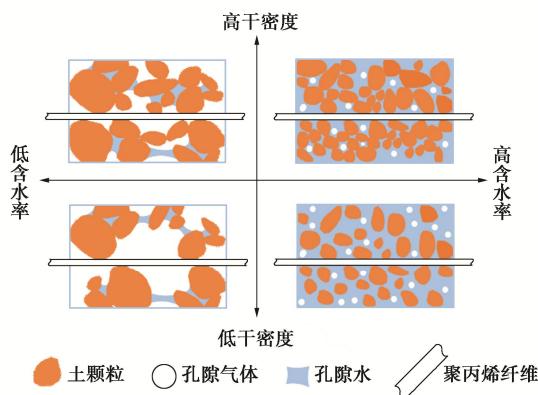


图9 不同初始状态下纤-土界面作用示意图

Fig. 9 Schematic diagram of structure of fiber-reinforced rammed earth under different initial conditions

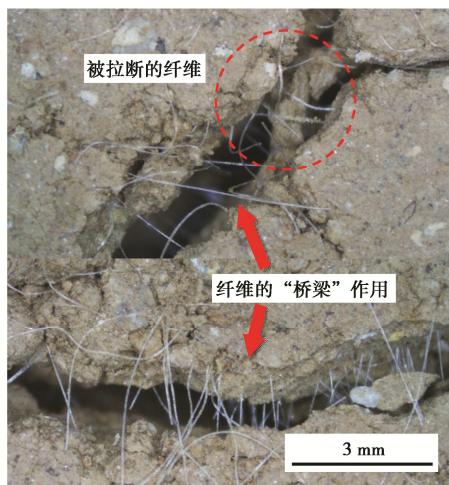


图10 纤维的“桥梁”作用

Fig. 10 “Bridging effect” of fiber

4 结 论

通过开展一系列室内干燥及劈裂试验, 研究了不同压实状态下纤维加筋土坯的蒸发过程及抗拉强度特性, 得到以下主要结论:

(1) 纤维加筋土坯的蒸发过程受初始压实状态的

影响。蒸发速率随初始含水率的增大而增大, 随初始干密度增大而减小。在土坯中加入纤维, 对土坯干燥蒸发过程的影响不明显。

(2) 在本文研究的纤维掺量范围内(0~0.2%), 纤维加筋土坯干燥蒸发结束后的残余含水率呈现“先降后升”的趋势, 当纤维掺量为0.1%时残余含水率最低。此外, 其残余含水率还随初始含水率和初始干密度的增大而增大, 这主要是因为土坯的初始结构不同改变了土坯的持水能力。

(3) 纤维加筋能有效改善土坯的拉伸力学性能。纤维加筋土坯的抗拉强度随纤维掺量呈“先升后缓”趋势。对南京地区的下蜀土而言, 在掺量为0~0.1%范围内, 纤维的掺入对土坯抗拉强度的提升效果非常明显。而当掺量超过0.1%后, 纤维掺量的进一步增加对土坯抗拉强度的贡献不明显, 但能有效抑制土坯破坏时的脆性, 提高土坯的残余抗拉强度及韧性, 这对土坯结构的稳定性和安全性具有重要积极意义。综合而言, 本文试验条件确定的最优纤维掺量为0.1%。

(4) 提高土坯的初始含水率和初始干密度, 有利于提高土坯的抗拉强度和纤维加筋效果。而纤维加筋土坯破坏后的残余抗拉强度与纤维掺量呈现正相关关系。这主要与纤维-土界面力学作用条件及纤维的拉筋效果得到改善有关。

总体而言, 纤维加筋对土坯抗拉特性具有正面作用, 是一种有效的土体增强技术, 有较为广阔的应用前景。本文是该课题的前期工作, 后续会在纤维加筋材料优化、纤-土界面微观作用机制、纤维加筋土坯耐久性等方面开展更细致和深入的研究。

参考文献:

- [1] PACHECO-TORGAL F, JALALI S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction[J]. Construction and Building Materials, 2012, **29**: 512~519.
- [2] HALL M, DJERBIB Y. Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency[J]. Construction and Building Materials, 2004, **18**(4): 281~286.
- [3] 刘军, 袁大鹏, 周红红, 等. 狗尾草对加筋土坯力学性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, **26**(4): 720~723, 733. (LIU Jun, YUAN Da-peng, ZHOU Hong-hong, et al. Impact of green bristle grass on mechanical properties of reinforced rammed earth[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2010, **26**(4): 720~723, 733. (in Chinese))
- [4] EASTON D. The Rammed Earth House[M]. Vermont: Chelsea Green Publishing Company, 2007: 1~42.
- [5] KOUAKOUC H, MORELJ C. Strength and elasto-plastic

- properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder[J]. *Applied Clay Science*, 2009, **44**(1/2): 27 – 34.
- [6] SILVEIRA D, VARUM H, ANÍBAL Costa, et al. Mechanical properties of rammed earth bricks in ancient constructions[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, **28**(1): 36 – 44.
- [7] JAQUIN P A, AUGARDE C E, GALLIPOLI D, et al. The strength of unstabilised rammed earth materials[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(5): 487 – 490.
- [8] BUI Q B, MOREL J C, HANS S, et al. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth[J]. *Construction and Building materials*, 2014, **54**: 163 – 169.
- [9] BECKETT C, CIANCIO D. Effect of compaction water content on the strength of cement-stabilized rammed earth materials[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, **51**(5): 583 – 590.
- [10] EL-NABOUCH R, BUI Q B, PLÉ O, et al. Characterizing the shear parameters of rammed earth material by using a full-scale direct shear box[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, **171**: 414 – 420.
- [11] ARAKI H, KOSEKI J, SATO T. Tensile strength of compacted rammed earth materials[J]. *Soils and Foundations*, 2016, **56**(2): 189 – 204.
- [12] 谢约翰, 唐朝生, 尹黎阳, 等. 纤维加筋微生物固化砂土的力学特性[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(4): 675 – 682. (XIE Yue-han, TANG Chao-sheng, YIN Li-yang, et al. Mechanical behavior of microbial-induced calcite precipitation (MICP) - treated soil with fiber reinforcement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(4): 675 – 682. (in Chinese))
- [13] TANG C S, WANG D Y, CUI Y J, et al. Tensile strength of fiber-reinforced soil[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, **28**(7): 04016031.
- [14] 唐朝生, 施斌, 高玮, 等. 纤维加筋土中单根纤维的拉拔试验及临界加筋长度的确定[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(8): 2225 – 2230. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, GAO Wei, et al. Single fiber pull-out test and the determination of critical fiber reinforcement length for fiber reinforced soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(8): 2225 – 2230. (in Chinese))
- [15] PATEL S K, SINGH B. Strength and deformation behavior of fiber-reinforced cohesive soil under varying moisture and compaction states[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017, **35**(4): 1767 – 1781.
- [16] CONSOLI N C, BASSANI M A A, FESTUGATO L. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, **28**(4): 344 – 351.
- [17] 王德银, 唐朝生, 李建, 等. 纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度特性[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(10): 1933 – 1940. (WANG De-yin, TANG Chao-sheng, LI Jian, et al. Shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(10): 1933 – 1940. (in Chinese))
- [18] TANG C S, SHI B, GAO W, et al. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, **25**(3): 194 – 202.
- [19] TANG C S, SHI B, ZHAO L Z. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, **28**(1): 54 – 62.
- [20] AN N, TANG C S, XU S K, et al. Effects of soil characteristics on moisture evaporation[J]. *Engineering Geology*, 2018, **239**: 126 – 135.
- [21] FRYDMAN S. Applicability of the Brazilian (indirect tension) test to soils[J]. *Australian Journal of Applied Science*, 1964, **15**(4): 335 – 343.
- [22] 王德银, 唐朝生, 李建, 等. 纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度特性[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(10): 1933 – 1940. (WANG De-yin, TANG Chao-sheng, LI Jian, et al. Shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, **35**(10): 1933 – 1940. (in Chinese))
- [23] HILLEL D. *Introduction to Environmental Soil Physics*[M]. Massachusetts: Academic Press, 2003: 337 – 361.
- [24] MILLERC J, RIFAI S. Fiber Reinforcement for waste containment soil liners[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, **130**(8): 891 – 895.
- [25] DELAGE P, AUDIGUIER M, CUI Y J, et al. Microstructure of a compacted silt[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, **33**(1): 150 – 158.
- [26] CHADUVULA U, VISWANADHAM B V S, KODIKARA J. A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber-reinforced expansive clay[J]. *Applied Clay Science*, 2017, **142**: 163 – 172.
- [27] MILLOGO Y, MOREL J C, AUBERT J E, et al. Experimental analysis of pressed rammed earth blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, **52**: 71 – 78.
- [28] TANG C S, SHI B, GAO W, et al. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, **25**(2): 194 – 202.