

# 稻草加筋土边坡稳定性模型试验

郝建斌<sup>1</sup>, 张 焕<sup>1,2</sup>, 李 龙<sup>1,3</sup>, 蒋臻蔚<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710061; 2. 陕西省建筑职工大学, 陕西 西安 710043;  
3. 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100038)

**摘要:** 为了研究稻草加筋土边坡的稳定性及变形破坏特征, 先后开展了稻草加筋土无侧限抗压强度试验与边坡稳定性模型试验。通过无侧限抗压强度试验得出, 在土体中加入稻草, 可有效抑制土体的变形, 且当稻草加筋率为 0.2%、筋材长度为 25 mm, 即最优加筋条件时, 加筋土无侧限抗压强度最大, 对试样变形的抑制效果最好。在此基础上, 开展了最优加筋条件下的稻草加筋土边坡稳定性模型试验, 试验结果表明, 相较于素土边坡, 稻草加筋可有效提高边坡极限承载力, 减小竖向位移; 素土边坡与加筋土边坡的水平位移变化趋势均可分为稳定、等速变形和加速变形(包括弱加速变形阶段与强加速变形阶段)三阶段演化, 稻草的加筋作用在弱加速变形阶段发挥明显, 能显著提高坡体抵抗变形能力; 加筋土边坡完全破坏后产生的滑面深而广, 且滑面周围小裂隙相对较多, 整体性与稳定性均优于素土边坡。

**关键词:** 边坡稳定性; 加筋土; 稻草; 模型试验

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)02-0176-07

## Model test on stability of straw reinforced soil slope

HAO Jianbin<sup>1</sup>, ZHANG Huan<sup>1,2</sup>, LI Long<sup>1,3</sup>, JIANG Zhenwei<sup>1</sup>

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;  
2. Architecture Zabor University of Shaanxi Province, Xi'an 710043, China;  
3. BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China)

**Abstract:** In order to study the stability and deformation failure characteristics of rice straw reinforced soil slope, the unconfined compressive strength test and slope stability model test of rice straw reinforced soil were carried out successively. According to the unconfined compressive strength test, the soil deformation can be effectively inhibited by adding straw to the soil, and when the reinforcement rate of straw is 0.2% and the length of reinforcement is 25mm, which is the optimal reinforcement condition, the unconfined compressive strength of the reinforced soil is the highest, and the straw have the best inhibition effect on the deformation of the sample. On this basis, the stability model test of straw reinforced soil slope under the optimal reinforcement condition was carried out. The test results show that compared with the plain soil slope, the straw reinforcement can effectively improve the ultimate bearing capacity of the slope and reduce the vertical displacement. The horizontal displacement trend of both plain soil slopes and reinforced soil slopes can be divided into three stages of evolution: stable stage, constant velocity deformation stage, and accelerated deformation stage (including weak acceleration deformation stage and strong acceleration deformation stage), and the reinforcement effect of straw plays a significant role in the weak acceleration deformation stage, which can significantly improve the slope's resistance to deformation. After the complete failure of the reinforced soil slope, the sliding surface is deep and wide, and there are relatively more small cracks around the sliding surface, so the overall integrity and stability are better than those of the plain soil slope.

**Key words:** slope stability; reinforced soil; straw; model test

加筋土是一种有效的土体改良技术, 其特点是在土体中加入一定比例的筋材, 以改善土体力学性质, 从而提高土体的强度, 增强土体的整体稳定性。其中, 天然植物不乏为一种具有极高研

收稿日期: 2021-09-17

修回日期: 2024-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(41472266); 国家自然科学基金(42077260)

第一作者: 郝建斌(1975—), 女, 博士, 教授, 主要从事方向岩土体稳定及安全性评价研究。E-mail: haojb@chd.edu.cn

通信作者: 张 焕(1998—), 女, 硕士, 主要从事边坡稳定性及安全性评价等研究。E-mail: 1136749785@qq.com

究价值的加筋材料, 一些工程实例<sup>[1]</sup>也证明, 用天然植物作为加筋材料是可行的。

近年来, 许多学者和研究人员也相继开展了各种天然植物加筋土的研究, 如稻草秸秆<sup>[2-3]</sup>、纸莎草纤维<sup>[4]</sup>、椰叶<sup>[5]</sup>、甘蔗渣<sup>[6]</sup>、剑麻纤维<sup>[7-8]</sup>、藤条<sup>[9]</sup>、棉纤维<sup>[10]</sup>等。上述研究均肯定了植物加筋材料对土体的加筋作用, 如在粘性土中掺入剑麻纤维, 可使土体的粘聚力平均提高 50% 以上<sup>[7]</sup>; 黄麻纤维具有限制膨胀土裂隙发展的作用, 同时可显著提高膨胀土的抗剪强度与无侧限抗压强度<sup>[11]</sup>; 植物根系可提高土体抵抗渗透破坏的能力<sup>[12]</sup>, 亦能降低膨胀土的无荷膨胀率并减小膨胀力<sup>[13]</sup>; 玄武岩纤维加筋石灰改良黄土可通过提高土体黏聚力来提高土体抗剪强度<sup>[14]</sup>。但关于天然植物加筋土在边坡稳定性方面的应用研究却甚少。因此, 开展这方面的研究是一项有意义的工作。

在选择天然加筋材料的过程中, 要综合考虑多种因素, 因地制宜是优先考虑的因素。在北方, 麦秸秆、稻草是资源较为丰富的农业废弃物, 将其作为加筋材料是废物利用且对环境友好的选择。关于麦秸秆加筋土的研究, 课题组已经做了详细研究<sup>[15-17]</sup>, 本文主要开展稻草加筋黏性土的研究。根据已有研究<sup>[10-18]</sup>, 在最优含水量条件下, 无侧限抗压强度试验与抗剪强度试验得出的最优加筋率

是相吻合的, 因此, 本文采用无侧限抗压强度试验以确定稻草的最优加筋长度和最优加筋率, 并基于此开展稻草加筋边坡模型试验, 从宏观角度对稻草的加筋作用效果进行研究, 观测分析其位移变化趋势、失稳过程与破坏形式。

1 试验材料

1.1 试验用土

本次试验用土为粉质黏土, 取自咸阳市泾阳县, 其基本物理指标见表 1。

表 1 试验土基本物理指标  
Tab. 1 Basic physical indexes of test soil

最优含水率/%	最大干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	塑限/%	液限/%	塑性指数 $IP$
16.8	1.9	17.8	34.6	16.8

1.2 稻草

试验所用稻草取自陕西省榆林市无定河流域有机水稻种植基地。考虑到稻草有可能处于潮湿或者浸水状态, 分别选取干燥和浸水 12 h 后的稻草进行拉伸试验。所用稻草长度为 80 mm, 两端夹距共约 40 mm, 试验拉伸速度定为 1 mm/min。各组试验中稻草的极限拉伸力见表 2。从表 2 可知, 同种条件的稻草在浸水状态下的极限拉伸力均大于干燥状态下的极限拉伸力。

表 2 稻草的极限拉伸力(N)  
Tab. 2 The ultimate tensile force of straw/N

稻草形状	一束(6 根) 无茎节	一束(6 根) 有茎节	1 根 无茎节	1 根 有茎节	一束(6 根 1/4 状) 无茎节	一束(6 根 1/4 状) 有茎节
干燥	197.66	98.97	36	10.71	27.5	13.41
浸水	236.2	109.2	39	12.89	67.04	20.66

2 试验方案

2.1 无侧限抗压强度试验

参考已有文献<sup>[2-3]</sup>, 选取质量加筋率(干稻草与干土的质量比)分别为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和 0.5%, 加筋长度分别为 10、15、20、25 和 30 mm。试验前, 先将干燥稻草碾压扁平, 再将其切成所需长度, 图 1 为切好的稻草。将稻草与烘干的试验用土按比例混合均匀, 加水配至最优含水率, 焖放 24 h 后, 采用静压法制备试样, 每组 3 个平行试样。

无侧限抗压强度试验所用仪器为 TFB—1 型应力应变式非饱和土三轴剪切仪, 试验的剪切速率为 1 mm/min, 每隔 0.1 s 系统采集一次数据。



图 1 试验用稻草

Fig. 1 Straw for the experiment

2.2 边坡模型试验

2.2.1 试验概况

边坡模型为概化模型设计, 模型整体尺寸为宽 70 cm、高 65 cm、深 90 cm, 坡度 1 : 1, 边坡模型剖面图如图 2 所示。为了进一步证明稻草加筋土边坡的稳定性, 试验分为素土边坡和稻草加筋土边坡

两组,其中稻草加筋土边坡采用无侧限抗压试验所得出的最优加筋配比方案(即加筋率 0.2%、筋材长度 25 mm)进行加筋。模型箱主体框架均采用方钢焊制,后壁和底板均为 1 cm 厚钢板,两侧安装透明有机玻璃(外表布置红色刻度线),用来观察边坡在加载过程中的变形和破坏现象。

边坡采用分层填筑,当填筑至玻璃红色刻度时,在靠近玻璃侧面的土体边缘撒上白灰线(与玻璃上的红色刻度线重合),加载过程中白灰线随坡体的竖向沉降产生竖向位移,测量白线与红色刻度线的垂直距离,即为坡体的竖向位移,坡体自上而下布置 3 个测量点,分别为 #1、#2 和 #3;在坡面正前方等距布设 4 个位移计,自上而下编号为 #4、#5、#6 和 #7,用于测量坡体水平位移,位置如图 2 所示。

### 2.2.2 加载与测试方案

加载时在坡顶放置垫板(长 70 cm、宽 15 cm、厚度 1.5 cm),使坡体顶部受均布荷载。垫板上方放置压力传感器,配合数显称重控制器,实现对荷载的精确控制。首次加载 50 kPa,每级加载幅值 10 kPa。加载后,每两个小时测量并记录一次数据,直至两次数据相等,即视作变形基本稳定,再进行下一级加载,同时观察数显称重控制器的数据变

表 3 无侧限抗压强度平均值(kPa)

Tab. 3 Average unconfined compressive strength/kPa

加筋率/%	加筋长度/mm					
	0	10	15	20	25	30
0	90.1	/	/	/	/	/
0.1	/	128.6	136.8	146.5	148.7	134.6
0.2	/	145.1	153.8	165.4	169.2	164.5
0.3	/	135.3	137.5	152.1	162.7	151.4
0.4	/	131.6	139.9	149.2	159.3	138.8
0.5	/	121.3	125.2	140.5	146.4	125.3

对比试验数据,可明显看出加筋土的抗压强度明显大于素土的抗压强度,可见稻草加筋可有效提高土体的强度。抗压强度值较大的三种加筋方案分别为:①加筋率 0.2%、筋材长度 20 mm,抗压强度值为 165.4 kPa;②加筋率 0.2%、筋材长度 25 mm,抗压强度值为 169.2 kPa;③加筋率 0.2%、筋材长度 30 mm,抗压强度值为 164.5 kPa。据此,确定基于最优含水率下得到的最优加筋条件为:加筋率 0.2%、筋材长度 25 mm。

### 3.1.2 破坏特征分析

为了对比素土与加筋土试样受力破坏过程的显著差异,将素土试样和加筋土试样(加筋率

化情况,当其读数不再增加或明显减小,则认为边坡模型完全破坏,停止加载。

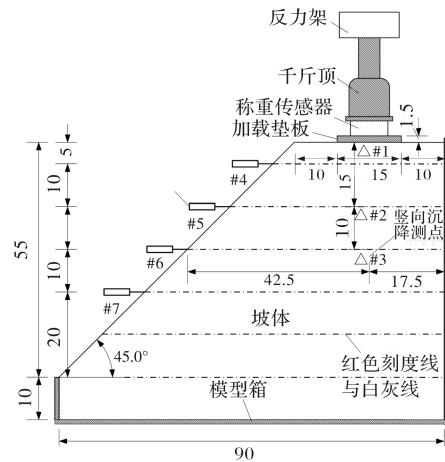


图 2 边坡模型剖面图(cm)

Fig. 2 Profile of slope model (cm)

## 3 试验结果与分析

### 3.1 无侧限抗压强度试验

#### 3.1.1 强度特性分析

取每组试验轴向应力峰值的平均值作为试样的抗压强度值,统计结果见表 3。

0.2%、筋材长度 20 mm)的变形破坏特征进行比较分析。图 3 为素土试样和加筋土试样破坏结果。

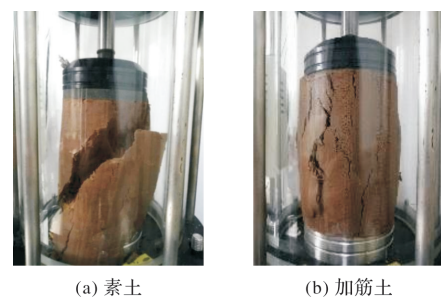


图 3 素土试样与加筋土试样破坏形态比较

Fig. 3 Comparison of failure modes between plain soil sample and reinforced soil sample

从图3可见,素土试样破坏时具有典型的剪切破坏面,并沿剪切破坏面发生断裂,如图3(a);加筋土试样在整个加载过程中,局部先出现细小裂隙,之后又出现多条小裂隙,原有裂隙变长变宽并延伸,加载至完全破坏时,除了明显的鼓起外,并没有明显的土块脱落和剪切破坏,如图3(b).可见,稻草加筋对土体起到了很好的加固作用,可有效限制土体的变形破坏.

### 3.2 边坡模型试验

#### 3.2.1 竖向位移

由于量尺测量微小位移变化的局限性,故试验中每连续加载 50 kPa 测量一次竖向位移.图4为边坡模型不同深度的荷载—竖向位移关系图.分析图4可知:素土边坡和加筋土边坡的竖向位移随坡顶荷载的增大而增加,且增加的幅度逐渐变大,量测点深度越深,对应的竖向位移越小;同一级荷载作用下,素土边坡的沉降位移明显大于加筋土边坡.当荷载达到 300 kPa 时,素土边坡完全破坏,测点#1~#3对应的竖向位移分别为 64、17、6 mm;而同级荷载下,加筋土边坡同位置竖向位移为 18、5、2 mm,比素土边坡约减小了 71.88%、70.59%、66.67%.当荷载达到 380 kPa 时,加筋土边坡才完全破坏,测点#1~#3竖向位移分别为 45、11、3 mm,比素土边坡完全破坏时相应的竖向位移小得多.

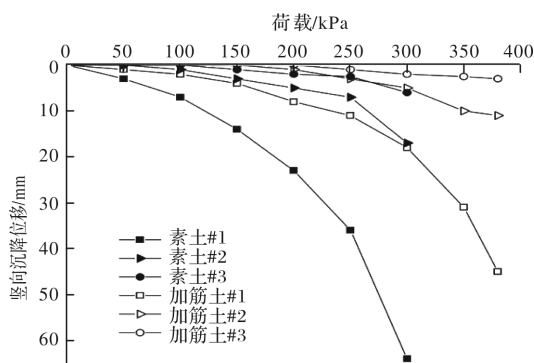


图4 加载过程中边坡的竖向位移变化曲线

Fig. 4 Vertical settlement displacement curve of slope in the loading process

边坡发生剪切破坏发展到即将失稳时所能承受的最大荷载值,即为该边坡的极限承载力.据此,加筋土边坡的极限承载力为 380 kPa,较素土边坡的极限承载力(300 kPa)提高了约 26.7%,说明稻草加筋能较大幅度提高边坡的承载力.从图4可看出,当坡顶荷载越大,素土边坡与加筋土边坡的竖向位移差值越大,表明外部荷载较大时,稻草的加筋作用更加显著.分析其原因,当荷载

较小时,边坡自身刚度足以抵抗变形,稻草未发挥加筋作用,随着荷载的增大,坡体得到进一步压实,

同时坡体产生沿潜在滑面发生下滑的趋势,筋材与土粒间的间隙变小、变少,使得筋材与其周围土体间的相互作用力增大,使得加筋土整体的内摩擦力与粘聚力增大,加筋作用逐渐发挥,限制了坡体变形,坡体下滑趋势减弱,相应地边坡竖向位移减小,极限承载力与坡体稳定性显著提高.

#### 3.2.2 水平位移

图5为边坡模型各测点水平位移随荷载变化的关系图,从图5可以看出:在坡顶荷载的作用下,素土边坡与加筋土边坡的位移变化趋势均表现为典型的三阶段演化规律,即稳定、等速变形和加速变形阶段.当荷载小于 50 时,两组边坡都处于稳定阶段;当荷载为 50~230 kPa 时,素土边坡处于等速变形阶段,而加筋土边坡该变形阶段对应的荷载为 50~280 kPa;当荷载分别大于 230、250 kPa 时,素土边坡和加筋土边坡的变形开始逐渐加速;荷载小于 250 kPa 时,素土边坡处于弱加速变形阶段,之后开始强加速变形直至破坏;而对于加筋土边坡,弱加速变形范围相对较大,对应荷载为 280~350 kPa,之后开始强加速变形,直至破坏.

分析认为,由于边坡为人工边坡,没有前期固结沉降,因此在加载初期,坡体处于压实阶段,主要以压缩变形为主,水平位移基本为 0.随着荷载的增加,坡体开始出现少量细小裂隙,此时水平位移逐渐增大,边坡进入等速变形阶段.同时,由于在初始荷载作用下的压实效应不能传递到坡体下部,在荷载作用过程中,既有浅层的裂隙发育与扩展,又有深层的进一步压实作用,因此水平位移从坡顶到坡脚依次减小.随后,边坡进入加速变形阶段,此阶段前期为弱加速变形阶段,后期为强加速变形阶段.在弱加速变形阶段,细小裂隙逐渐发展为大裂缝,水平位移增速较上一阶段明显增大,随后边坡开始强加速变形,水平位移变化曲线斜率陡增,宏观特征表现为大裂隙的迅速延伸与贯通,形成清晰的弧形滑动面,直至失稳.

总体上,边坡的变形是由弹性变形逐渐转化为塑性变形的过程,相比之下加筋可以增大边坡模型的塑性<sup>[19]</sup>.对比图5(a)、(b),加筋土边坡的弱加速变形范围大于素土边坡,进一步说明稻草



加筋可以提高边坡的抗变形能力. 分析其原因, 随着土体密实度的增大, 稻草筋材与土颗粒间的咬合与摩擦力逐渐增大, 复合体结构的抗剪强度随之增大, 逐渐与剪切力平衡, 减缓了其从弹性变形转化为塑性变形的趋势, 同时增大了土体的残余强度. 完全破坏后, 两组边坡模型的最大水平位移都是出现在#5测点附近, 约为距坡顶三分之一坡高处, 这与介玉新等<sup>[20]</sup>实验结果一致. 素土边坡受力达到极限荷载时, #4~#7测点的水平位移分别为8.13、11.69、6.79、0.87 mm, 同级荷载下加筋土边坡相同测点的水平位移分别减小了85.12%、85.79%、81.15%、15.12%. 可见, 加筋能有效减小坡体中上部土体的水平位移, 对下部土体位移变化影响较小. 因此, 稻草加筋能有效限制边坡的侧向变形, 提高边坡抵抗变形的能力.

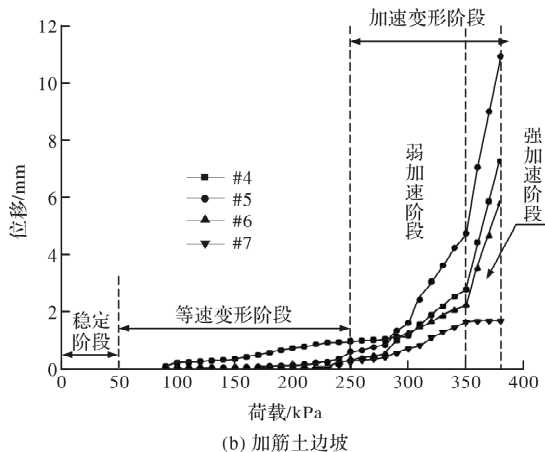
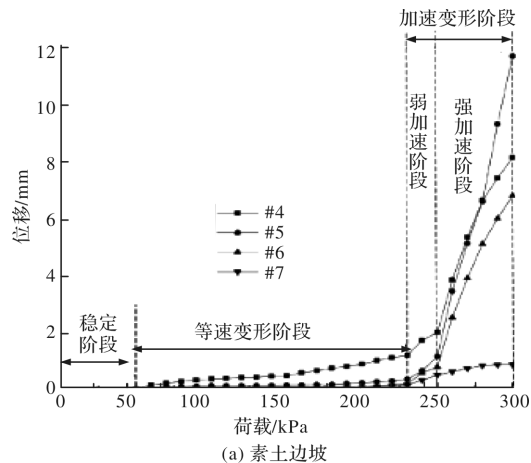


图5 加载过程中边坡的水平位移变化曲线

Fig. 5 Horizontal displacement curve of slope in the loading process

### 3.2.3 边坡破坏过程

图6为素土边坡与加筋土边坡的失稳破坏照片, 图中裂缝按其出现的先后顺序进行标号. 素土边坡在荷载达到200 kPa时, 侧面出现第一条裂

缝, 坡面无明显裂缝; 到230 kPa时, 坡面出现第一条不连续水平裂缝, 侧面新增裂缝2, 弧形滑动面已经较明显; 继续加载, 坡面水平裂缝附近表面凸起; 到300 kPa时, 坡面裂缝1周围表面突起部分逐渐脱落, 新增裂缝2和3, 侧面裂缝完全贯通, 形成清晰的滑动面, 坡体完全破坏.

稻草加筋土边坡在荷载为250 kPa时, 坡面才开始出现第一条裂缝, 侧面产生微小裂纹; 为280 kPa时, 坡面出现裂缝2, 侧面微小裂纹发展为细小裂缝; 为300 kPa时, 坡面新增横向裂缝3、4与纵向裂缝5; 随着荷载的增大, 原有裂隙继续发育, 坡面裂缝2基本完全贯通, 侧面细小裂缝有连接成弧线的趋势; 为350 kPa时, 坡面新增纵向裂缝6, 边坡沿裂缝3和4出现错开迹象, 侧面在裂缝1下方出现弧形裂缝2, 并衍生出大量小裂隙; 为380 kPa时, 坡体沿侧面的裂缝2所在滑动面发生剪切破坏.

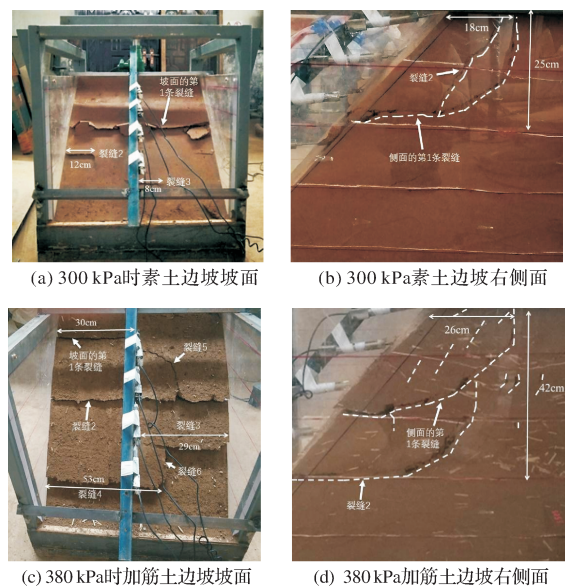


图6 素土边坡与加筋土边坡完全破坏图

Fig. 6 Failure modes of plain soil slope and reinforced soil slope

通过对比分析, 加筋土边坡和素土边坡的变形破坏特征主要表现在以下几个方面:

(1) 稻草加筋土边坡的极限承载力远远大于素土边坡的承载力, 本概化模型中加筋土边坡的承载力约为素土边坡模型1.27倍;

(2) 加筋土边坡的裂缝发育过程比较缓慢, 且完全破坏时, 素土边坡主滑面周围小裂缝较少, 而加筋土边坡主滑面周围存在大量不规则裂缝;

(3) 素土边坡出现明显的“表皮脱落”现象, 加筋土坡面未出现此现象. 图7为两组边坡模型破坏时的滑动面, 由图可以看出当坡体失稳时, 加筋

土边坡的滑面较素土边坡的滑面深而广,素土边坡与加筋土边坡的滑动面底部分别距边坡底部30、20 cm.

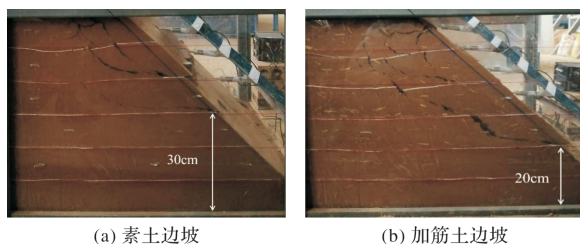


图7 素土边坡与加筋土边坡滑动面比较

Fig. 7 Comparison of sliding surfaces between plain soil slope and reinforced soil slope

## 4 结论

(1)针对本次试验材料,该稻草加筋土的最优加筋配比为加筋率0.2%、筋材长度25 mm,较素土的抗压强度值增加了约0.88倍;

(2)同荷载作用下,加筋土边坡的竖向位移明显小于素土边坡.加筋土边坡的极限承载力为380 kPa,较素土边坡(300 kPa)提高了约26.7%;

(3)素土边坡和加筋土边坡的水平位移变化均有稳定阶段、等速变形阶段和加速变形阶段(包括弱加速变形阶段和强加速变形阶段),而稻草的加筋作用在弱加速变形阶段发挥明显,有效提高了坡体抵抗变形的能力;

(4)素土边坡主滑面周围小裂缝较少,而加筋土边坡主滑面周围衍生出许多不规则的小裂缝,且加筋土边坡的滑面较素土边坡的滑面深而广;

(5)模型试验结果进一步验证了稻草加筋可以提高土体的抗剪强度,增强边坡稳定性.

## 参考文献 References

- [1] 李广信. 地震与加筋土结构[J]. 土木工程学报, 2016, 49(7): 1-8.  
LI Guangxin. Earthquake and earth reinforcement [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(7): 1-8.
- [2] 柴寿喜, 石茜. 加筋长度和加筋率下的稻草加筋土强度特征[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2012, 13(6): 646-650.  
CHAI Shouxi, SHI Qian. Strength and deformation of saline soil reinforced with rice straw [J]. Journal of Army Engineering University of PLA, 2012, 13(6): 646-650.
- [3] 王桂尧, 沙琳川, 曹文贵, 等. 加筋率对稻秸秆加筋土开裂特性的试验研究 [J]. 水文地质工程地质,

2017, 44(5): 52-58, 65.

WANG Guiyao, SHA Linchuan, CAO Wengui, et al. An experiment study of cracking properties of rice straw reinforced soil with different ratios [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 52-58, 65.

- [4] ADILI 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] JISHNU V P, SANKAR N, CHANDRAKARAN S. Strength behaviour of cohesionless soil reinforced with coconut leaf let as a natural material [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 31(S2): 340-347.
- [6] GHASEMI N M, ALIREZA T, NIMA L. Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(3): 626-642.
- [7] 吴燕开, 牛斌, 桑贤松. 随机分布剑麻纤维加筋土力学性能试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(6): 77-81.  
WU Yankai, NIU Bin, SANG Xiansong. Experimental study of mechanical properties of soil randomly included with sisal fiber [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(6): 77-81.
- [8] 宋泽卓, 刘瑾, 王梓, 等. 剑麻纤维-聚丙烯酰胺改良客土干缩开裂试验研究 [J]. 工程地质学报, 2024, 32(1): 28-38.  
SONG Zezhuo, LIU Jin, WANG Zi, et al. Experimental study on dry shrinkage cracking of sisal fiber-polyacrylamide modified external soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(1): 28-38.
- [9] SHIEN N K, KOK S N, EVODIUS D D, et al. Compressive failure of rattan reinforced soil mixture [C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Malaysia: Perang, 2020, 917(1): 1-10.
- [10] LIU J L, HOU T S, LUO Y S, et al. Experimental study on unconsolidated undrained shear strength characteristics of synthetic cotton fiber reinforced soil [J]. Geotechnical and Geological Engineering: An International Journal, 2020, 38(10): 1773-1783.
- [11] 钱叶琳, 王洁, 吕卫柯, 等. 黄麻纤维加筋土的强度特性及增强机理研究 [J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2016, 33(2): 19-24.  
QIAN Yelin, WANG Jie, LÜ Wei, et al. Research on strength characteristics and improving mechanism of Jute fiber-reinforced soil [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition),

- 2016, 33(2): 19-24.
- [12] 王元战, 刘旭菲, 张智凯. 草根加筋土渗透性和强度试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 140-147.
- WANG Yuanzhan, LIU Xufei, ZHANG Zhikai. Experimental research on permeability and strength of grassroots-reinforced soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1): 140-147.
- [13] 李润发, 王桂尧, 张永杰, 等. 种植香根草根系对膨胀土特性影响的试验研究 [J]. 公路交通科技, 2020, 37(5): 43-52.
- LI Runfa, WANG Guiyao, ZHANG Yongjie, et al. Experimental study on influence of planting vetiver root on characteristics of expansive soil [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(5): 43-52.
- [14] 刘华, 胡文乐, 何朋立, 等. 玄武岩纤维灰土力学特性及扩宽路堤边坡稳定性分析 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(1): 53-60.
- LIU Hua, HU Wenle, HE Pengli, et al. Mechanical properties of basalt fiber ash soil and stability analysis of widened embankment slope [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(1): 53-60.
- [15] 郝建斌, 魏兴梅, 姚婕, 等. 麦秸秆加筋土的强度特性及细观结构分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 764-768, 831.
- HAO Jianbin, WEI Xingmei, YAO Jie, et al. Strength characteristics and mesostructure of wheat straw reinforced soil [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(6): 764-768, 831.
- [16] 姚婕. 麦秸秆加筋土强度特性试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.
- YAO Jie. Experimental study on strength characteristics of wheat straw reinforced soil [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [17] 张振北. 麦秸秆加筋黏性土强度特性及微观试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
- ZHANG Zhenbei. Study on the strength characteristics and microscopical experiment of soil reinforced by wheat straw [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [18] 胡小庆, 洪柳, 徐光黎, 等. 纤维含量及长度对纤维加筋土强度的影响研究 [J]. 安全与环境工程, 2015, 22(2): 139-143.
- HU Xiaqing, HONG Liu, XU Guangli, et al. Impacts of fiber content and fiber length on the strength and deformation of fiber reinforced soil [J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(2): 139-143.
- [19] 李丽华, 崔飞龙, 肖衡林, 等. 轮胎与格室加筋路堤性能及承载力研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 81-88.
- LI Lihua, CUI Feilong, XIAO Henglin, et al. Performance and bearing capacity of embankments reinforced with waste tires and geocells [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 81-88.
- [20] 介玉新, 洛桑尼玛, 郑瑞华, 等. 加筋土边坡的破坏形式 [J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 693-699.
- JIE Yuxin, LOPSANG Nyema, ZHENG Ruihua, et al. Failure pattern of reinforced soil slopes [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 693-699.

(编辑 吴海西)