

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.008



# 麦秸秆的筋土摩擦性能及加筋作用

魏丽, 柴寿喜, 蔡宏洲, 郑娇娇, 姜宇波

(天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384)

**摘要:**为研究麦秸秆加筋土的筋土作用与加筋效果,以含水率、干密度及麦秸秆埋置深度为影响因素,开展了麦秸秆与盐渍土的拉拔摩擦实验;完成了盐渍土、麦秸秆加筋盐渍土、石灰固化土、麦秸秆与石灰加筋固化土的抗压实验和三轴压缩实验。结果表明:麦秸秆与盐渍土的拉拔摩擦强度随含水率的增大而减小,随干密度和埋置深度的增加而增大,干密度、含水率、埋置深度对筋土摩擦作用的影响程度依次减小;与盐渍土及石灰固化土相比,麦秸秆加筋大幅提高了土的抗压强度、抗剪强度与抗变形性能。麦秸秆具有良好的筋土摩擦性能和加筋效果,麦秸秆加筋能有效增强土的力学性能。

**关键词:**麦秸秆;筋土摩擦;加筋土;抗压强度;抗剪强度

**中图分类号:**TU472 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)06-0053-07

## Frictional characteristics of wheat straw in saline soil and evaluation of reinforcing effect

Wei Li, Chai Shouxi, Cai Hongzhou, Zheng Jiaojiao, Jiang Yubo

(School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, P. R. China)

**Abstract:** To examine the frictional characteristics of wheat straw in saline soil, which is influenced by water content, dry density and embedment length of wheat straw, the pulling-out test is carried out. The unconfined compressive test and triaxial test of four kinds of samples, including saline soil, wheat straw-saline soil, lime-saline soil and wheat straw-lime-saline soil, were conducted. The results showed that the friction strength decreases with the increase of water content, and increases when the dry density and embedment length increase. It has been certified that the influences from the dry density, water content and the embedment length on friction strength decrease successively. In comparison with saline soil and lime-saline soil, unconfined compressive strength, triaxial shear strength and deformation resistance of the soil are significantly improved due to the added wheat straw. The frictional characteristics of wheat straw in saline soil have been revealed and the reinforcing effect is considerable, providing an effective method for soil stabilization.

**Keywords:** wheat straw; frictional characteristics; reinforced soil; compressive strength; shear strength

**收稿日期:**2017-12-05

**基金项目:**天津市科技支撑计划(15ZXCXSF00070);天津市自然科学基金(17JCYBJC22200、17JCZDJC39200);天津市城市建设委员会科技项目(2015-12);天津市高等学校科技发展基金计划项目(20120911)

**作者简介:**魏丽(1979-),女,副教授,博士生,主要从事盐渍土的改性固化与加筋处置研究,E-mail: weili\_79@126.com.

**Received:**2017-12-05

**Foundation item:** The Key Technologies R & D Program of Tianjin(No. 15ZXCXSF00070); Natural Science Foundation of Tianjin(No. 17JCYBJC22200, 17JCZDJC39200); Science and Technology Project of Tianjin Urban & Rural Construction Commission (No. 2015-12); Science and Technology Development Foundation of University of Tianjin(No. 20120911)

**Author brief:** Wei Li(1979-), associate professor, PhD candidate, main research interests: solidification and reinforcement of saline soil, E-mail: weili\_79@126.com.

当土的强度较低时,通常在土中掺入石灰、水泥等工程材料进行固化<sup>[1]</sup>,或掺入聚丙烯、尼龙等合成纤维及草根、黄麻、棕榈等天然纤维提高土的力学性能<sup>[2-6]</sup>。麦秸秆为天然纤维材料,具有一定的抗拉和抗变形能力。实验证实,对麦秸秆进行防腐处理后,其抗拉性能与抗腐蚀性显著提高<sup>[7]</sup>。将麦秸秆均匀分散于土中,可提高土的强度与抗变形性能,还具有绿色环保、废物利用的优势<sup>[8]</sup>。

纤维加筋土的强度和稳定性来源于筋土摩擦作用和交织纤维的立体约束作用<sup>[9]</sup>。当加筋土受力变形时,筋土界面粘聚力和界面摩擦力限制了土颗粒的滑动,此时分散在土中的纤维起到拉筋作用<sup>[10-11]</sup>。筋土摩擦力和粘聚力越大,纤维越不容易在土中发生滑动或被拔出,可有效延缓张拉裂缝的产生与发展,提高土的强度和抗变形能力。当加筋土受压时,在弯曲纤维的凹侧产生对土颗粒的下压力和摩擦力,发挥筋土摩擦作用;当土受到挤压时,纤维交织点处的土颗粒产生位移趋势,临近的纤维就会阻止这种位移,形成对土的立体约束作用<sup>[12]</sup>。

麦秸秆与土料均匀混合,没有形成明显的筋土界面,有别于土工格栅等材料在土中的分层铺设方式,因此,筋土摩擦性能无法通过传统的直剪实验和拉拔实验进行测试<sup>[13-14]</sup>。为此,专门设计了麦秸秆拉拔摩擦实验的试样制备装置与测试装置,以测试麦秸秆在土中的拉拔摩擦强度,描述拉拔力与位移的相关关系。

土的含水率与干密度是筋土界面摩擦性能的主要影响因素<sup>[15]</sup>。当麦秸秆在土中埋置一定深度时,才能反映出拉拔力与筋土位错的变化过程。因此,确定以含水率、干密度及麦秸秆埋置深度为影响因素,开展筋土拉拔摩擦实验,分析各因素对筋土摩擦强度的影响程度,探讨麦秸秆拉拔力与位移及筋土摩擦强度随各因素的变化规律。为验证麦秸秆的加筋效果,完成了盐渍土、麦秸秆加筋盐渍土、石灰固化土、麦秸秆加筋石灰固化土的无侧限抗压实验和三轴压缩实验,以此评价麦秸秆加筋对土的抗压、抗剪和抗变形性能的影响。

## 1 实验设备与试样制备

### 1.1 实验设备

1.1.1 拉拔弯折实验机 全自动多量程拉拔弯折实验机,型号 LTW-500N,可用于拉伸线状和片状材料。

麦秸秆拉拔摩擦试样直径 61.8 mm,高 125 mm,麦秸秆一端埋入土中一定深度,另一端放入拉伸夹具中。在麦秸秆空心中放入一截直径 4 mm 的

圆木柱,夹具两侧设有半圆形凹槽,与麦秸秆相匹配,以保证麦秸秆的端部呈圆形,均匀受压。拉拔弯折实验机及拉拔试样安装见图 1。

拉拔速率为 2 mm/min,计算机采集拉拔力与拉拔位移。实验过程中,上部夹具不动,下部夹具匀速下降。麦秸秆拉拔力骤减时,实验结束。



(a) 拉拔实验机 (b) 试样安装

图 1 拉拔实验机

Fig. 1 The device of pulling-out test

1.1.2 制样装置和脱模装置 采用双向静力挤压法制备试样。制样模具包括模筒、上压柱、下压柱和脱模柱,其主视图和俯视图如图 2 所示。在上压柱和脱模柱的中心设置一个圆孔,直径为 10 mm,制样和脱模时将麦秸秆的自由端伸入圆孔中,以免麦秸秆被挤压。制样装置与脱模装置如图 3 所示。

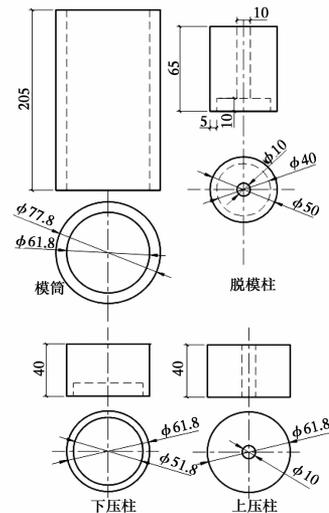


图 2 模具设计图

Fig. 2 Mould drawings



(a) 制样装置 (b) 脱模装置

图 3 制样装置与脱模装置

Fig. 3 Devices for making sample and stripping sample

## 1.2 实验材料

选择粗细均匀、内径为4 mm的无茎节麦秸秆,风干后截成实验所需的长度。

实验所用的氯盐渍土取自天津滨海新区,含盐量2.65%,塑性指数11.2,为粉质粘土。重型击实实验获得最优含水率17.6%,最大干密度 $1.81 \text{ g/cm}^3$ 。将土风干碾碎,过2 mm筛后备用。

生石灰粉的有效钙镁成分含量70%。

## 1.3 拉拔实验试样的制备

### 1.3.1 制样条件

1)以土的最优含水率17.6%为基准,上下浮动2%左右,即16%、17.6%和20%。

2)以麦秸秆加筋土填筑路堤,按路基分层及道路等级选择压实度95%、93%和90%,对应的干密度为 $1.72$ 、 $1.68$ 和 $1.63 \text{ g/cm}^3$ 。

3)埋置深度小于20 mm时,麦秸秆很容易被拔出。埋置深度分别设置为20、40、60、80、100、125 mm。

### 1.3.2 制样步骤

1)按不同的含水率配制土料,浸润一昼夜;

2)选择直径4 mm的麦秸秆,量取每根麦秸秆的总长度,控制麦秸秆埋入深度,计算筋土接触面积;

3)在制样模筒内壁涂抹油脂,将麦秸秆的一端置于模筒中心,然后在麦秸秆四周填埋土料,另一端深入到上压柱的圆孔内。在上压柱的顶端放置麦秸秆铅直固定装置,并测量麦秸秆的埋置深度。上下同时缓慢挤压两个压柱,使其全部进入模筒中。静置10 min后,使用脱模柱缓慢推出试样。

## 1.4 抗压试样与三轴压缩试样的制样条件

制备盐渍土、麦秸秆加筋盐渍土、石灰固化土、麦秸秆与石灰加筋固化土的无侧限抗压试样和三轴压缩试样。制样条件:

1)含水率17.6%,干密度 $1.72 \text{ g/cm}^3$ (为95%压实度)。

2)石灰掺量8%,养护龄期28 d。

3)抗压试样直径50 mm,高50 mm;三轴压缩试样直径61.8 mm,高125 mm。

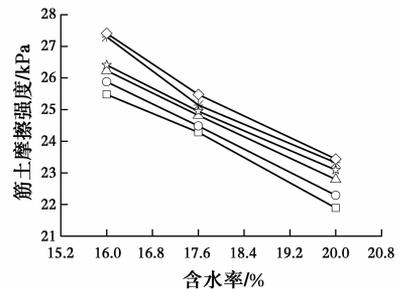
4)麦秸秆的质量加筋率0.25%;抗压试样加筋长度10 mm,三轴压缩试样加筋长度20 mm<sup>[7,16]</sup>。

## 2 筋土摩擦性能

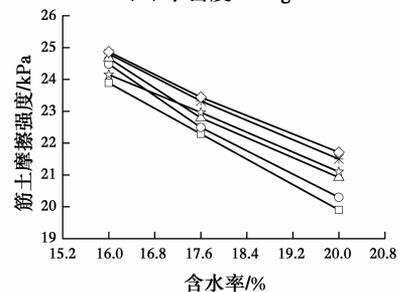
### 2.1 含水率、干密度及麦秸秆埋置深度对筋土摩擦强度的影响

2.1.1 含水率与干密度 图4为3个干密度6个

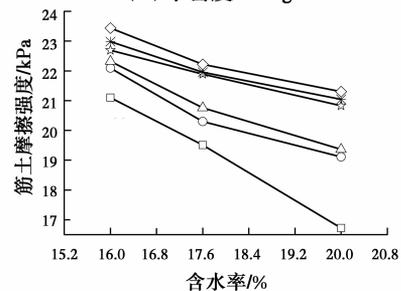
埋置深度试样的筋土摩擦强度随含水率的变化曲线。



(a) 干密度 $1.72 \text{ g/cm}^3$



(b) 干密度 $1.68 \text{ g/cm}^3$



(c) 干密度 $1.63 \text{ g/cm}^3$

注:—□—20 mm —○—40 mm —△—60 mm —◇—80 mm  
—\*—100 mm —◇—125 mm

图4 麦秸秆与盐渍土的筋土摩擦强度随含水率的变化曲线

Fig. 4 Friction strength of wheat straw in saline soil vs. water content

1)筋土摩擦强度随含水率的增加而减小。以干密度 $1.72 \text{ g/cm}^3$ 的试样为例,当含水率从16%增加到20%时,麦秸秆埋置深度20、40、60、80、100、125 mm的筋土摩擦强度分别减小了14.1%、13.9%、13.1%、12.6%、14.6%和14.5%。因为筋土摩擦强度主要来源于粘聚力和摩擦力。粘聚力受土的粘粒含量与含水率影响;摩擦力不仅与土颗粒形状和级配相关,还取决于土的含水率、麦秸秆粗糙程度及筋土接触面积等因素。

当含水率增大时,界面的自由水增多,有利于麦秸秆表面的润滑作用,减小了筋土接触面的摩擦系数。由于粘土颗粒的结合水膜变厚,在拉拔过程中界面附近土颗粒的重新排列所需的外力也相应

减小。因此,筋土摩擦强度随含水率的增加而下降。

2)筋土摩擦强度随干密度的增加而增大。以含水率 17.6% 的试样为例,当干密度从  $1.63 \text{ g/cm}^3$  增加到  $1.72 \text{ g/cm}^3$  时,麦秸秆埋置深度 20、40、60、80、100、125 mm 的筋土摩擦强度分别增加 19.6%、17.1%、16.4%、12.2%、12.7% 和 12.8%。因为干密度大的试样在制样时需要较大的压实功,土柱施加给麦秸秆表面的包裹力越大,筋土摩擦强度也就越大。同时,增加土的干密度,导致孔隙比减小,麦秸秆与土颗粒的接触面积增大,界面粘聚力增强。

2.1.2 麦秸秆埋置深度 图 5 为 3 个干密度 3 个含水率试样的筋土摩擦强度随埋置深度的变化曲线。

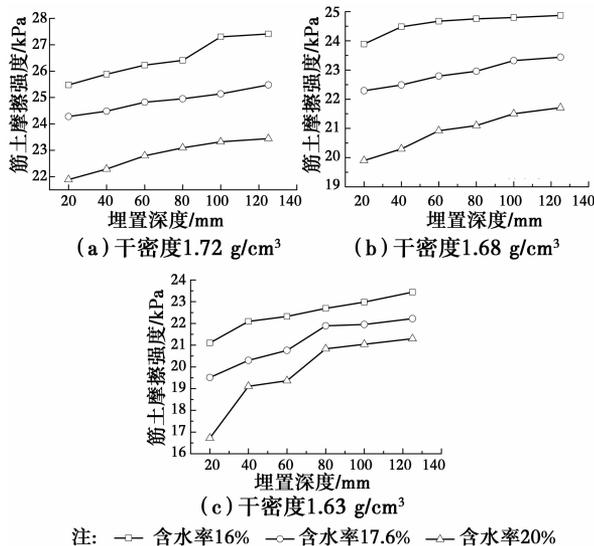


图 5 麦秸秆与盐渍土的筋土摩擦强度随埋置深度变化曲线  
Fig. 5 Friction strength of wheat straw in saline soil vs. embedment length

麦秸秆与盐渍土的筋土摩擦强度随埋置深度的增加而增大。主要因为:埋置深度越大,其表面受到的压力越大,将麦秸秆拔出或拔断所需的力越大,筋土摩擦作用有所增强。以干密度  $1.72 \text{ g/cm}^3$  含水率 16% 的试样为例,埋置深度由 20 mm 增加到 40、60、80、100、125 mm 时,筋土摩擦强度分别增加 1.6%、2.9%、3.6%、7.1% 和 7.6%。

## 2.2 不同因素对筋土摩擦强度的影响程度分析

由图 4 和图 5 可见,筋土摩擦强度与含水率、干密度及麦秸秆埋置深度均呈线性关系。筋土摩擦强度随含水率和干密度的变化较大,而随埋置深度的变化趋势则较为平缓。借助 SPSS 软件,通过多元线性回归分析,计算 3 个影响因素与筋土摩擦强度的相关性。结果见表 1。

表 1 3 个影响因素与筋土摩擦强度与的单相关系数

Tab. 1 Correlation coefficient on friction strength and three factors

影响因素	相关系数	显著性
含水率	-0.628	0.000
干密度	0.677	0.000
埋置深度	0.310	0.022

由表 1 可知,干密度、埋置深度与筋土摩擦强度呈正相关,而含水率与筋土摩擦强度成负相关。相关系数的绝对值越大、显著性越接近于 0,对筋土摩擦强度的影响程度就越大。因此,3 个因素对筋土摩擦强度的影响程度依次减小为干密度、含水率和埋置深度。

筋土摩擦强度为因变量  $Y$ , 3 个影响因素为自变量  $x$ , 建立多元线性回归模型, 得出筋土摩擦强度与含水率、干密度和埋置深度的线性回归方程为

$$Y = -0.829x_1 + 39.913x_2 + 0.019x_3 - 30.593$$

式中:  $Y$  为筋土摩擦强度;  $x_1$  为含水率;  $x_2$  为干密度;  $x_3$  为埋置深度。

图 6 为标准残差直方图。图 7 为回归-标准化残差的标准  $P-P$  图。

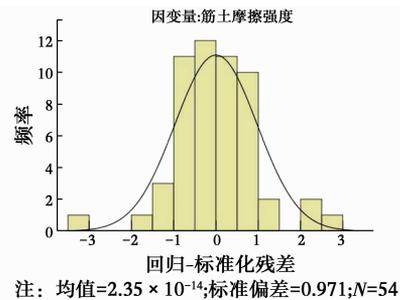


图 6 标准化残差直方图

Fig. 6 Standardization residual sequence histogram

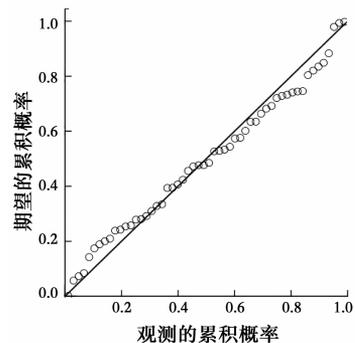


图 7 标准化残差正态概率图

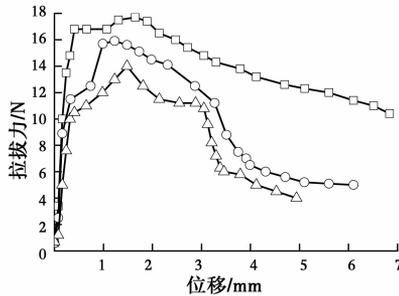
Fig. 7 Standardization residual sequence normal probability plot

标准化残差分布服从正态分布, 观测的散点基本上都分布在对角线周边, 说明观测的残差累计概

率符合正态分布,最终可以认定残差分布服从正态分布,该方程有意义。多元线性回归模型对纤维加筋土筋土摩擦强度的影响因素分析是适宜的。

### 2.3 麦秸秆拉拔力与筋土位移的关系

图 8 为干密度  $1.72 \text{ g/cm}^3$ ,埋置深度  $60 \text{ mm}$  的 3 个含水率试样拉拔力随筋土位移变化曲线。

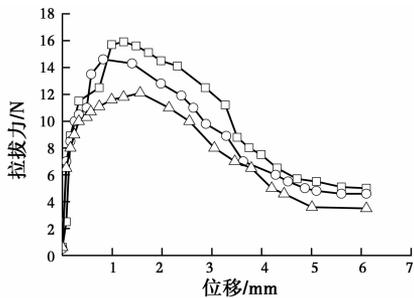


注: —□— 含水率16% —○— 含水率17.6% —△— 含水率20%

图 8 不同含水率试样的拉拔力随筋土位移的变化曲线

Fig. 8 Pulling force of wheat straw in saline soil in the conditions of three water contents vs. displacement

图 9 为含水率  $17.6\%$ ,埋置深度  $60 \text{ mm}$  的 3 个干密度试样拉拔力随筋土位移变化曲线。

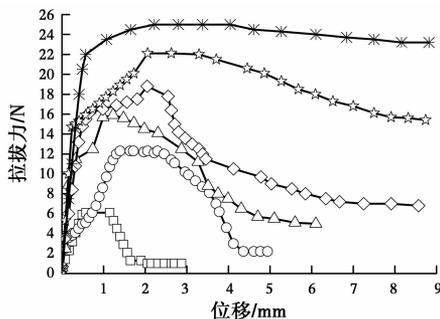


注: —□— 干密度 $1.72 \text{ g/cm}^3$  —○— 干密度 $1.68 \text{ g/cm}^3$  —△— 干密度 $1.62 \text{ g/cm}^3$

图 9 不同干密度试样的拉拔力随筋土位移的变化曲线

Fig. 9 Pulling force of wheat straw in saline soil in the conditions of three dry densities vs. displacement

图 10 为含水率  $17.6\%$ ,干密度  $1.72 \text{ g/cm}^3$  的 6 个埋置深度试样拉拔力随筋土位移变化曲线。



注: —□— 20 mm —○— 40 mm —△— 60 mm —◇— 80 mm —\*— 100 mm —×— 125 mm

图 10 不同埋置深度试样的拉拔力随筋土位移变化曲线

Fig. 10 Pulling force of wheat straw in saline soil in the conditions of six embedment lengths vs. displacement

麦秸秆拉拔力随筋土位移的增大近线性增大。初始,麦秸秆发生弹性变形,此时,麦秸秆所受的荷载小于筋土摩擦力,拉伸荷载以应变能的形式存储在麦秸秆的自由长度段内。拉拔力继续增大,达到峰值后,筋土接触面发生松动,拉拔力迅速减小。在随后拉拔过程中,筋土界面作用以滑动摩擦力为主,使麦秸秆拉拔力趋于定值。

观察图 8~图 10,拉拔力均随含水率的增大而减小,随干密度和埋置深度的增加而增大。这与图 4 和图 5 中筋土摩擦强度的变化规律相对应。

图 8~图 10 还显示,麦秸秆被拉动后,筋土作用力并没有完全消失。说明当加筋土出现张裂缝或剪切面时,麦秸秆加筋可有效延缓或阻止裂缝的发展,增强土的抗变形性能。这与麦秸秆加筋土在三轴压缩实验中呈现较大破坏应变的实验结果相吻合。

### 3 麦秸秆加筋土的加筋效果评价

麦秸秆在土中随机分布,其加筋作用主要包括筋土摩擦作用和空间约束作用。麦秸秆在土中的分布形态呈直线状或弯曲状,麦秸秆呈直线状时的筋土摩擦强度可通过拉拔摩擦实验测试,而麦秸秆弯曲时对土颗粒产生下压力和摩擦力,目前的实验手段很难测出。

麦秸秆的加筋作用从宏观上表现为加筋土力学性能的提高。以麦秸秆加筋土的抗压强度、抗剪强度及试样的破坏形态,评价麦秸秆加筋对土的强度与抗变形性能的改善效果。表 2 为盐渍土、麦秸秆加筋盐渍土、石灰固化土、麦秸秆加筋石灰固化土的抗压强度、抗剪强度及破坏应变。

表 2 4 种试样的抗压强度与抗剪强度及破坏应变

Table 2 Unconfined compressive strength, shear strength and failure strain of four kinds of samples

试样类别	抗压实验		三轴压缩实验		
	抗压强度/kPa	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	峰值偏应力/kPa	破坏应变/%
盐渍土	171.5	22.3	11	271.7	13.5
加筋盐渍土	259.6	41.6	12	456	17.7
固化土	778.4	290.5	32	1 650	4.1
加筋固化土	1 114.2	368.4	33	2 235	8.5

注:峰值偏应力与破坏应变为  $400 \text{ kPa}$  围压下的数值。

与盐渍土相比,麦秸秆加筋土的抗压强度提高  $51.4\%$ ,粘聚力提高  $86.5\%$ ,内摩擦角仅增加  $9.1\%$ ,破坏应变提高  $37\%$ 。与石灰固化土相比,麦

秸秆与石灰加筋固化土的抗压强度提高 43.1%，粘聚力提高 26.8%，内摩擦角仅增加 3.1%，破坏应变提高 107%。

由表 2 可知，麦秸秆加筋显著提高了土的抗压强度、抗剪强度和抗变形性能。麦秸秆的加筋作用主要表现为提高土的粘聚力，对内摩擦角的影响相对较小。石灰固化土为脆性土，达到峰值偏应力时所对应的破坏应变较小。麦秸秆与石灰加筋固化土的破坏应变较大，表现出良好的抗变形能力。原因在于：在外力作用下，麦秸秆与石灰固化土产生筋土摩擦力，麦秸秆起到拉筋作用，约束土的轴向与横向变形，延缓裂纹的产生与发展。麦秸秆在土中随机分布与交织，对土颗粒具有空间约束作用。两者共同作用下，土的力量与抗变形性能显著提高。

盐渍土、麦秸秆加筋盐渍土、石灰固化土、麦秸秆与石灰加筋固化土的剪切破坏形态见图 11。



图 11 4 种试样的剪切破坏形态

Fig. 11 Failure form of four kinds of samples for triaxial test

盐渍土破坏时，发生较大的横向变形，中上部鼓胀；加筋盐渍土的变形较为均匀，无明显鼓胀，轴向变形与横向变形都相对较小。固化土破坏时，横向变形较小，试样产生贯通的斜向裂纹，发生脆性破坏；加筋固化土破坏时，表面产生许多裂纹，中部发生轻微的鼓胀，总体上保持较为完整的形状，加筋使得破坏形式由固化土的脆性破坏转变为加筋固化土的塑性破坏。4 种试样的破坏形态与三轴压缩实验的峰值偏应力和破坏应变相一致。

## 4 结论

1) 麦秸秆与盐渍土的筋土摩擦强度随含水率的增大而减小，随干密度和埋置深度的增加而增大。多元线型回归分析显示，干密度、含水率和埋置深度 3 个因素对筋土摩擦强度的影响程度依次减小。

2) 麦秸秆的拉拔力随筋土位移的增大呈近似线性增大；达到峰值后，拉拔力迅速减小；随后筋土位移继续增加，此时，筋土界面的作用力以滑动摩擦力为主，麦秸秆的拉拔力最终趋于定值。

3) 麦秸秆与土的筋土摩擦作用及麦秸秆对土颗

粒的空间约束作用使得加筋土的抗压强度与抗剪强度大幅提高，并显著增强了土的抗变形性能。

## 参考文献：

- [1] 程寅, 李战国, 邓晓轩, 等. 一种新固化材料固化滨海氯盐渍土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1240-1245.  
CHENG Y, LI Z G, DENG X X, et al. Experimental study on a new stabilizer for stabilizing coastal chlorine soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1240-1245. (in Chinese)
- [2] MASOUMI E, FOROOSHANI S M A, NIAN F A. Problematic soft soil improvement with both polypropylene fiber and polyvinyl acetate resin [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 31(1): 143-149.
- [3] ESTABRAGH A R, BORDBAR A T, JAVADI A A. Mechanical behavior of a clay soil reinforced with nylon fibers [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29(5): 899-908.
- [4] ANGGRAINI V, ASADI A, HUAT B B K. Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil [J]. Measurement, 2014, 59: 372-381.
- [5] 卫杰, 张晓明, 丁树文, 等. 黄麻纤维加筋条件对崩岗岩土无侧限抗压强度的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 59-63.  
WEI J, ZHANG X M, DING S W, et al. Effects of reinforcement conditions of jute fiber on unconfined compressive strength of soil in collapsing hill [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(6): 59-63. (in Chinese)
- [6] BURYLO M, HUDEK C, REY F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps France)[J]. Catena, 2011, 84(1): 70-78.
- [7] 魏丽, 柴寿喜, 蔡宏洲, 等. 麦秸秆加筋材料抗拉性能的实验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 128-132.  
WEI L, CHAI S X, CAI H Z, et al. Research on tensility of wheat straw for reinforced material [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 128-132. (in Chinese)
- [8] 柴寿喜, 王沛, 王晓燕. 麦秸秆布筋区域与截面形状下的加筋土抗剪强度[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 123-127.  
CHAI S X, WANG P, WANG X Y. Effect of reinforcing range and cross section of wheat straw on shear strength of reinforced soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 123-127. (in Chinese)
- [9] HARNNECKER F, SANTOS ROSA D D, LENZ D M.

- Biodegradable polyester-based blend reinforced with curauá fiber; Thermal, mechanical and biodegradation behaviour [J]. *Journal of Polymers & the Environment*, 2011, 20(1): 237-244.
- [10] 李建,唐朝生,王德银,等. 基于单根纤维拉拔试验的波形纤维加筋土界面强度研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(9): 1696-1704.
- LI J, TANG C S, WANG D Y, et al. Single fiber pullout tests on interfacial shear strength of wave-shape fiber-reinforced soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(9): 1696-1704. (in Chinese)
- [11] QU J L, LI C C, LIU B S. Effect of random inclusion of wheat straw fibers on shear strength characteristics of shanghai cohesive soil [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2013, 31: 511-518.
- [12] ESTABRAGH A R, BORDBAR A T, JAVADI A A. A study on the mechanical behavior of a fiber-clay composite with natural fiber [J]. *Geotechnical and Geology Engineering*, 2012, 31(2): 501-510.
- [13] TANG C S, SHI B, ZHAO L Z. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil [J]. *Geotextile and Geomembranes*, 2010, 28(1): 54-62.
- [14] 赵占军. 土工格栅拉拔特性及加筋土剪胀性试验研究 [J]. *工业建筑*, 2016, 46(3): 88-91.
- ZHAO Z J. Test research on pull-out behavior of geogrid and dilatancy of reinforced soil [J]. *Industrial Construction*, 2016, 46(3): 88-91. (in Chinese)
- [15] 刘飞禹,林旭,王军,等. 循环剪切作用对格栅与砂土界面剪切特性的影响[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(2): 1-7.
- LIU F Y, LIN X, WANG J, et al. Effects of cyclic shear load on behavior of sand-geogrid interface [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(2): 1-7. (in Chinese)
- [16] LI M, CHAI S X, ZHANG H Y, et al. Feasibility of saline soil reinforced with treated wheat straw and lime [J]. *Soils and Foundations*, 2012, 52(2): 231-241.

(编辑 王秀玲)