

# 麦秸秆加筋土的强度特性及细观结构分析

郝建斌<sup>1,2</sup>, 魏兴梅<sup>1</sup>, 姚 婕<sup>1,3</sup>, 张振北<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 国土资源部岩土工程开放研究实验室, 陕西 西安 710054;  
3. 新疆送变电有限公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 为了分析麦秸秆加筋对土体抗剪强度的影响,开展了 4 种加筋率(0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%)和 3 种加筋长度(5, 10, 15 mm)下的三轴剪切试验。通过 CT(计算机断层扫描)扫描图像,对比分析了加筋土和素土在加载过程中的细观结构变化。结果表明:麦秸秆加筋黏性土的抗剪强度和抗变形能力较素土都有显著提高,其中筋材长度为 10 mm 时加筋效果较好。所研究加筋条件下,土体黏聚力较素土黏聚力增大 0.1~2.3 倍,内摩擦角变化在 $\pm 2^\circ$ 范围内。与素土相比,加筋土在剪切过程中无明显的宏观剪切破坏,均为鼓胀破坏。围压较小时,加筋作用明显,对土体的刚度影响较大,随着围压的增大,影响逐渐变小。CT 扫描结果显示,麦秸秆加筋能够限制土体变形和裂纹扩展。因此,麦秸秆适宜作为黏性土的加筋材料。

**关键词:** 麦秸秆加筋土; 三轴试验; 计算机断层扫描; 抗剪强度; 破坏形态; 细观结构

中图分类号: TU41

文献标志码: A

## Strength Characteristics and Mesostructure of Wheat Straw Reinforced Soil

HAO Jianbin<sup>1,2</sup>, WEI Xingmei<sup>1</sup>, YAO Jie<sup>1,3</sup>, ZHANG Zhenbei<sup>1</sup>

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang' an University, Xi'an 710054, China; 2. Open Research Laboratory for Geotechnical Engineering Ministry of Land and Resources, Chang' an University, Xi'an 710054, China; 3. State Grid Xinjiang Power Transmission and Substation Co., Ltd., Urumchi 830011, China)

**Abstract:** This study presents results of an laboratory triaxial experimental program with respect to study the effect of wheat straw reinforcement on the shear strength of soil. Three-axis shear tests were carried out under four reinforcement rates (0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%) and three reinforced lengths (5, 10, 15 mm). The mesostructure changes of reinforced soil and plain soil during loading are compared and analyzed by using computed tomography(CT)

scan image. The results show that: the shear strength and deformation resistance of wheat straw reinforced soil are significantly improved than plain soil, and the reinforcement effect is better when the wheat straw length is 10mm. In this condition, the cohesive forces of reinforced soil are 1.1 to 3.3 times that of unreinforced soil, the internal friction angle changes in the range of  $\pm 2$  degrees. Compared with plain soil, the macroscopic shear failure of reinforced soil during shearing is not obvious, and all of them are bulging failure. When the confining pressure is small, the effect of reinforcement is significant, and the effect on the stiffness of soil is fine. With the increase of confining pressure, the effect becomes weaker. CT scanning results show that wheat straw reinforcement can restrict soil deformation and crack growth. It is concluded from this study that wheat straws are a suitable reinforced material for cohesive soil.

**Key words:** wheat straw reinforced soil; triaxial test; computed tomography scanning; shear strength; failure mode; mesostructure

加筋是一种有效的土体改良技术,其特点是在土体中掺入一定比例的筋材,以增强土体的强度和稳定性,从而改善不良土的承载力、抗剪强度、抗压强度等特性,因此在工程中得到了广泛的应用。加筋土在我国很早就有应用,如距今 5000 多年前良渚古城的水利系统中就采用了这种工艺<sup>[1]</sup>。而国际岩土界认为,加筋土的概念是由法国工程师亨利·维达(Henri Vidal)在 1963 年(观察鸟类利用泥和草筑巢而受到启发)提出来的<sup>[1]</sup>。此后,很多学者与研究人员致力于各种加筋土材料及加筋土理论的研究,其中研究较多的则是人工加筋材料<sup>[2-6]</sup>。近年来,也逐渐开展了天然作物加筋作用的探索与研究<sup>[7-13]</sup>。研究表明,筋材种类、含量和长度是影响土体强度和性能

收稿日期: 2018-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(41472266); 中央高校基本科研业务费资助项目(310826172007, 300102268209)

第一作者: 郝建斌(1975—),女,教授,工学博士,主要研究方向为岩土体稳定及安全性评价。E-mail: haojb@chd.edu.cn

的主要因素<sup>[7]</sup>,如在粘性土中掺入剑麻纤维,可使土体的黏聚力平均提高 50% 以上,当纤维含量为 0.4%、纤维长度为 5 mm 时,可使土的无侧限抗压强度达到最大<sup>[8]</sup>.在膨胀土中加入黄麻纤维,可显著提高土体抗剪强度和膨胀土的无侧限抗压强度<sup>[9]</sup>.此外,植物根系也可提高土壤的黏聚力,从而提高土体的抗剪强度<sup>[10]</sup>.在植物加筋材料中,具有代表性且容易就地取材的还有农作物秸秆(麦秸秆,稻秸秆).其中,麦秸秆已被研究应用于加筋海滨盐渍土<sup>[11-12]</sup>、粘土<sup>[13]</sup>等.亦有研究表明,麦秸秆加筋土具有抗冲蚀性,具有很好的边坡防护效果<sup>[14]</sup>.此外,在民用建筑、道路工程等领域均有广阔的应用前景<sup>[15]</sup>.

本文基于三轴固结不排水(CU)试验,开展了麦秸秆加筋黏性土在不同加筋长度和不同加筋率时的抗剪强度试验研究,确定了最优加筋长度和最优加筋率.同时采用计算机断层扫描(computed tomography,CT)扫描试验,从土体细观结构的变化对麦秸秆的加筋作用效果进行了分析.

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

本次试验用土取自西安市某工地,基于界限含水率、轻型击实等土工试验,得出其基本物理力学性质指标如表 1 所示,此试验所用土为粉质黏土.

表 1 土体主要物理参数

Tab.1 Physical parameters of soil

最优含水率 /%	最大干密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^3$ )	液限 /%	塑限 /%	塑性指数
21.7	1.68	43.3	26.6	16.7

已有研究表明,天然麦秸秆的平均极限拉力约为 65 N<sup>[11]</sup>.本次试验选用的麦秸秆取自西安市蓝田县.麦秸秆与土混合前,用 0.4% 石灰水对其浸泡 24 h 进行防腐处理.试验中将麦秸秆外表皮剥去,用碾压工具将其碾压扁平,使其具有一定韧性,并按最优含水率配备试验用土.图 1 为试验用麦秸秆,图 2 为麦秸秆加筋土.

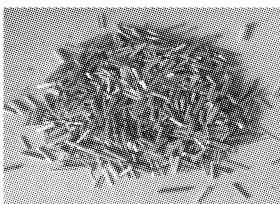


图 1 试验用麦秸秆  
Fig.1 Wheat straw for experiment



图 2 麦秸秆加筋土  
Fig.2 Wheat straw reinforced soil

### 1.2 试验设备与方案

三轴压缩试验所用仪器为南京土壤仪器厂生产的 SLB-1 型应力/应变控制式三轴剪切试验仪,试验选取的麦秸秆加筋率(干麦秸秆与干土的质量比)分别为 0.1%、0.2%、0.3% 和 0.4%,长度分别为 5、10 和 15 mm.试样为直径 61.8 mm,高 125 mm 的圆柱试样.考虑实际工程土体的主要影响深度范围及其对应的土压力,选取 4 种围压(50, 100, 200, 300 kPa),应变速率为 2 mm · min<sup>-1</sup>.

CT 扫描使用仪器为长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室的工业 CT 试验系统.考虑到加载过程的连续性,素土和加筋土均备三个试样.先对三个初始状态试样进行 CT 扫描,然后三个试样均进行无侧限抗压试验(加载速率为 1 mm · min<sup>-1</sup>),试样 1、试样 2 和试样 3 分别加载至轴向应变为 5%、10% 和 15% 时结束试验,最后对加载后的试样分别进行 CT 扫描.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 应力-应变曲线

图 3 和图 4 为不同围压下素土的应力-应变( $\sigma - \epsilon$ )曲线以及其破坏后的形态.

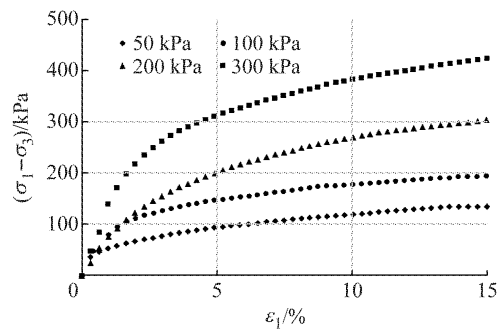


图 3 素土应力-应变关系曲线

Fig.3 Relationship between ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) and  $\epsilon_1$  of unreinforced soil

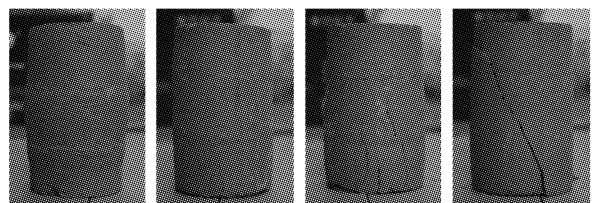


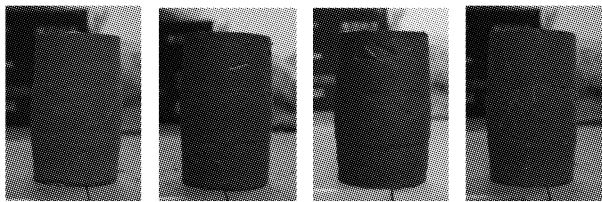
图 4 素土试样在不同围压下的破坏形态

Fig.4 Failure modes of unreinforced soil under different confining pressures

从图 3 可以看出:不同围压下的应力-应变曲线

均为硬化曲线,没有明显的峰值.低围压(50,100 kPa)下,曲线比较平缓;而高围压(200,300 kPa)下,曲线斜率明显增大.由图 4 可以看出:围压为 50 kPa 时,试样的破坏状态呈现“塑性鼓胀破坏”的特征,无明显剪切破坏;围压为 100 kPa 时,“鼓胀破坏”不明显,而在试样下端出现少量纵向裂纹;围压为 200 kPa 时,试样下端有多条纵向裂纹扩展至试样中部;围压为 300 kPa 时,试样出现明显的剪切破坏.

与素土相比,在土中掺入随机分布的麦秸秆,其破坏特征出现明显差异,加筋土样均出现“鼓胀破坏”,且未见明显裂纹或剪切破坏.图 5 为加筋土样在围压 300 kPa 时破坏后的形态.可见,麦秸秆加筋的效果是非常明显的,在同等应变条件下,仅出现塑性变形,较素土稳定.



a 0.1%,10 mm b 0.2%,15 mm c 0.3%,15 mm d 0.4%,10 mm

图 5 加筋土在围压 300 kPa 下破坏形态

Fig.5 Failure modes of reinforced soil under confining pressures of 300 kPa

表 2 为素土和加筋土的抗剪强度指标试验结果.从表 2 中可以看出,麦秸秆筋材长度为 10 mm 时,其内聚力增高最为明显,介于 41.3~85.3 kPa 之间,约为素土黏聚力的 2~3.3 倍;不论筋材长短,加筋土内摩擦角的变化随加筋率的增大呈现出先降低后增高的变化规律.综合抗剪强度的两项指标,认为最佳加筋长度为 10 mm.筋材在 10 mm 范围内,加筋率为 0.2%和 0.4%的加筋作用较强,其中前者

表 2 不同加筋条件下加筋土的抗剪强度指标

Tab.2 Shear strength index of reinforced soil with different reinforcement

筋材长度/%	加筋率/%	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ ( $^{\circ}$ )
5	0.1	34.3	22.94
	0.2	61.7	19.06
	0.3	54.8	20.82
	0.4	42.5	23.7
10	0.1	41.3	21.30
	0.2	85.3	17.39
	0.3	59.2	18.89
	0.4	52.0	22.66
15	0.1	28.6	22.90
	0.2	52.6	19.74
	0.3	47.0	19.98
	0.4	38.6	20.89
素土		25.9	21.72

主要表现在增加了土体的黏聚力(增大 2.3 倍),后者也增加了土体的黏聚力(增大 1 倍),但主要增大了土体的内摩擦角.可见,麦秸秆的掺入对土体的黏聚力和内摩擦角均有影响.

由于麦秸秆的密度小于土体的密度,当加筋率达到某一临界值时,将影响加筋土的压实效果.这个临界值是多少?这是值得研究的问题.但加筋率越高,筋土混合物中大尺度物质(筋材)就越多.考虑到尺寸效应的影响,本试验没有开展加筋率大于 0.4%的加筋土三轴试验.此外,由于本试验中受到试样大小的限制,试样尺寸较小,考虑到尺寸效应的影响,试验没有开展筋材长度大于 15 mm 的加筋土三轴试验.如加筋率大于 0.4%、筋材长度大于 15 mm,对土体的黏聚力和内摩擦角有何影响,后续将开展相关试验做进一步的研究.

为分析加筋率对土体强度特性的影响规律,绘制了筋材长度为 10 mm 的加筋土的应力-应变曲线,如图 6 所示.由图 6 可见,加筋土的应力-应变曲线仍呈现应变硬化特性,围压和加筋率的变化对曲线形状并无明显影响.围压的增大使土体刚度增加,而加筋率对土体刚度的影响则随围压的不同而不同.围压较小时,加筋土的刚度均比素土刚度大;随着围压的增大,刚度差距逐渐缩小;当围压为 300 kPa 时,加筋率的影响则不再明显.

## 2.2 CT 扫描结果

为分析比较素土和加筋土在荷载作用过程中的细观结构变化,以筋材长度 10 mm、加筋率为 0.2%的加筋土为试样,进行 CT 扫描.图 7~图 9 为素土在初始状态与不同应变(5%、10%、15%)时的 CT 扫描对比图像.从图中可以看出,初始状态下素土存在较多孔隙和微裂纹,对土体施加外荷载使轴向应变为 5%时,在细观结构上并无明显变化,此阶段主要为压实及弹性变化阶段.当轴向应变达到 10%时,逐渐出现横向小的裂纹,且有裂纹贯通的趋势,在贯通裂纹周边伴随形成许多微裂纹,此时土体处于塑性变形阶段.轴向应变达到 15%时,截面内可观察到大量裂纹,与应变 10%时相比,裂纹长而宽,且分布范围广,在整个截面内均有分布,此阶段土体基本处于破坏阶段.

图 10~图 12 为加筋土在初始状态与不同轴向应变(5%、10%、15%)时的 CT 扫描对比图像.从图 10 可看出,加筋土轴向应变为 5%时,土体内部也无细观结构的变化.当轴向应变达到 10%时,出现小的

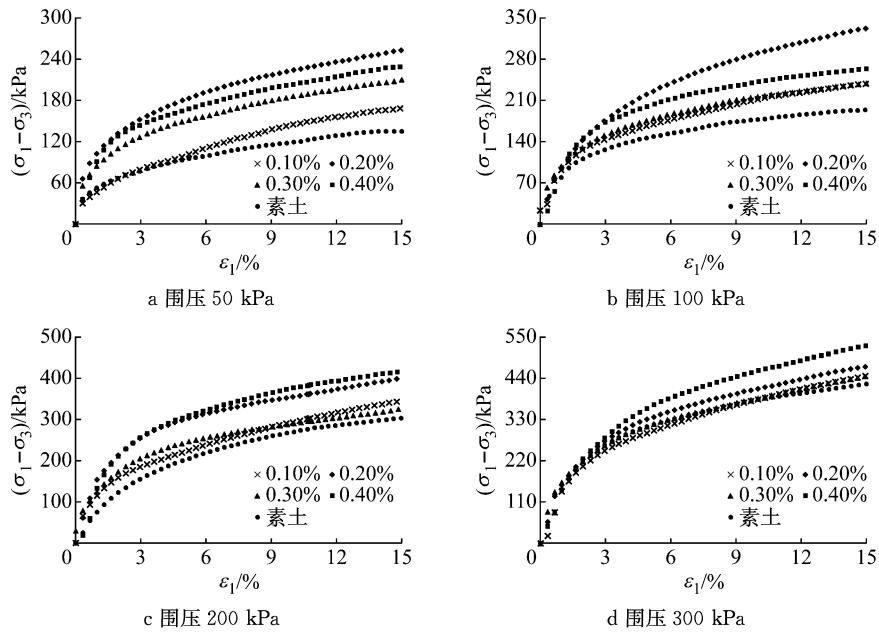


图 6 筋材长度为 10 mm 的加筋土应力-应变关系曲线

Fig.6 Relationship between  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  and  $\epsilon_1$  of reinforced soil with wheat straw (wheat straw length is 10 mm)

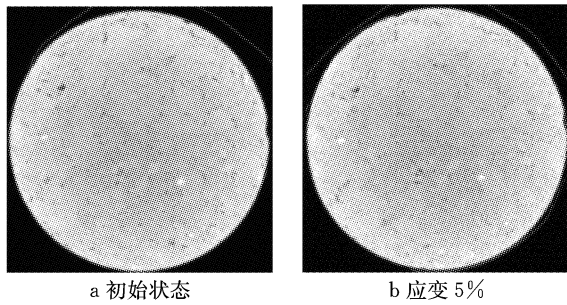


图 7 素土试样 1 的 CT 扫描图像

Fig.7 CT scanning image of unreinforced soil sample No.1

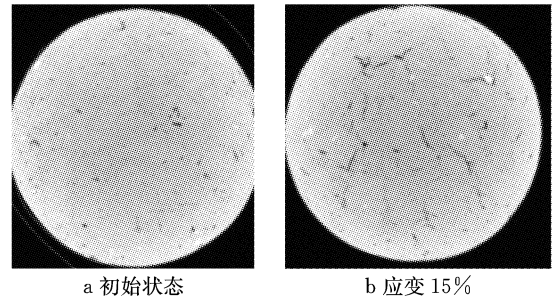


图 9 素土试样 3 的 CT 扫描图像

Fig.9 CT scanning image of unreinforced soil sample No.3

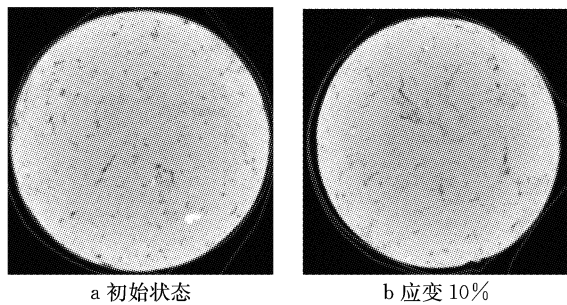


图 8 素土试样 2 的 CT 扫描图像

Fig.8 CT scanning image of unreinforced soil sample No.2

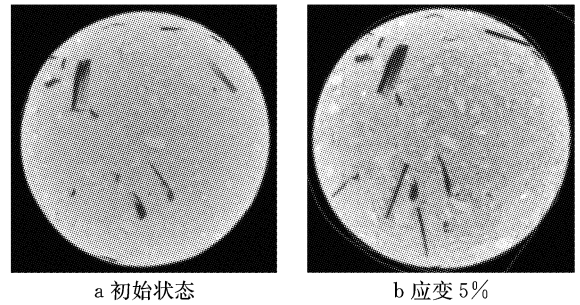
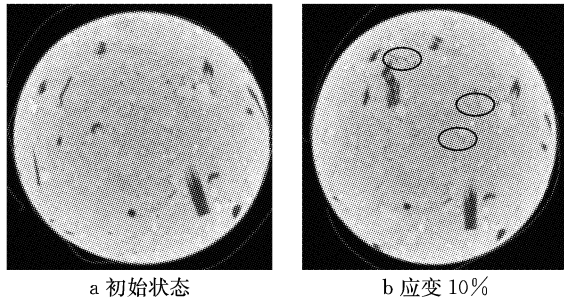


图 10 加筋土试样 1 的 CT 扫描图像

Fig.10 CT scanning image of reinforced soil sample No.1

扩展裂纹,但规模较小,仅在局部出现(图 11 中圈出部位)。对比分析图 8b 和图 11b 可知,加筋土与素土在应变为 10%时,加筋土裂纹在数量及延伸长度上均小于素土。应变达到 15%时,该截面上分布有三条

比较明显的裂纹(图 12 中圈出部位),但其他区域基本无裂纹。素土与加筋土相比较,素土内部裂纹较多且在整个截面内均分布。因此可见,麦秸秆加筋在限制土体变形方面的作用是非常显著的。

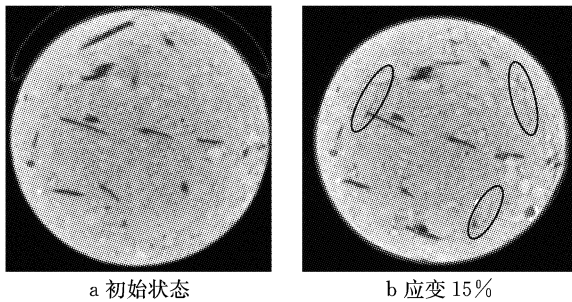


a 初始状态

b 应变 10%

图 11 加筋土试样 2 的 CT 扫描图像

Fig. 11 CT scanning image of reinforced soil sample No. 2



a 初始状态

b 应变 15%

图 12 加筋土试样 3 的 CT 扫描图像

Fig. 12 CT scanning image of reinforced soil sample No. 3

### 3 结论

本文进行了麦秸秆加筋黏性土的三轴剪切试验和 CT 扫描试验,分析得出如下结论:

(1) 麦秸秆加筋黏性土可以提高土体的抗剪强度,其中对黏聚力和摩擦角均有显著影响,其中长度为 10 mm 的筋材加筋效果较好。

(2) 素土在剪切过程中出现明显的宏观剪切破坏,同等轴向应变时,加筋土仅出现鼓胀破坏。

(3) 小围压作用时,麦秸秆加筋对土体的刚度影响较大,随着围压的增大,影响逐渐变小。

(4) CT 扫描结果显示,麦秸秆加筋在限制土体变形和裂纹扩展方面的作用非常显著。

(5) 需要指出的是,本文所得结论是在特定土质、含水率和试件尺寸下得出的,并不具有完全代表性。针对不同土质、不同含水率的土体,还需进行有针对性的试验研究。

#### 参考文献:

[1] 李广信. 地震与加筋土结构[J]. 土木工程学报, 2016, 49(7):1.  
LI Guangxin. Earthquake and earth reinforcement[J]. China

Civil Engineering Journal, 2016, 49(7):1.

- [2] 徐超, 贾斌, 罗玉珊, 等. 土工与加筋土组式挡墙离心模型试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(3):379.  
XU Chao, JIA Bin, LUO Yushan, *et al.* Centrifuge model tests of behavior of masonry and reinforced soil composite retaining wall[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2015, 43(3): 379.
- [3] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 纤维加筋土中筋/土界面相互作用的微观研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 610.  
TANG Chaosheng, SHI Bin, GU Kai. Microstructural study on interfacial interactions between fiber reinforcement and soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 610.
- [4] 施利国, 张孟喜, 曹鹏. 聚丙烯纤维加筋灰土的三轴强度特性[J]. 岩土力学, 2011, 32(9):2721.  
SHI Ligu, ZHANG Mengxi, CAO Peng. Triaxial shear strength characteristics of lime-soil reinforced with polypropylene fiber inclusions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2721.
- [5] TANG Chaosheng, SHI Bin, CUI Yujun, *et al.* Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber - reinforced clayey soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(9): 1088.
- [6] ANAGNOSTOPOULOS C, TZETZIS D, BERKETIS K. Shear strength behaviour of polypropylene fibre reinforced cohesive soils [J]. Geomechanics and Geoengineering, 2014, 9(3): 241.
- [7] CHEGENIZADEH A, NIKRAZ H. Effective parameters on strength of fibre reinforced soil[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 166-169(1): 1630.
- [8] 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.  
WU Yankai, NIU Bin, SANG Xiansong. Experimental study of mechanical properties of soil randomly included with sisal fiber [J]. Engineering Geology of Hydrogeology, 2012, 39(6): 77.
- [9] 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.  
QIAN Yelin, WANG Jie, LV Weike, *et al.* Research on strength characteristics and improving mechanism of Jute fiber-reinforced soil [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science), 2016, 33(2): 19.
- [10] 王元战, 刘旭菲, 张智凯, 等. 含根量对原状与重塑草根加筋土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8):1405.  
WANG Yuanzhan, LIU Xufei, ZHANG Zhikai, *et al.* Experimental research on influence of root content on strength of undisturbed and remolded grassroots-reinforced soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8):1405.
- [11] 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.  
LI Min, CHAI Shouxi, WEI Li. Mechanical properties of wheat straw and strength of its reinforced inshore saline soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 545.
- [12] 魏丽, 柴寿喜, 蔡宏洲, 等. 麦秸秆的物理力学性能及加筋盐渍土的抗压强度[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 93.

(下转第 831 页)

- XU Weichang, LI Zhenting, WANG Yonghua, *et al.* Test and analysis of track dynamic response on the sections with WJ-7 fastenings of large adjustment[J]. *Railway Standard Design*, 2014(10):26.
- [5] 谭社会. 高速铁路无砟轨道线形纠偏技术进展研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018(2):310.  
TAN Shehui. State of lifting and inclination correction technique of high-speed railway ballastless track[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018(2):310.
- [6] 邢小墨. 高速铁路无砟轨道抬升纠偏新技术研究[J]. *铁道建筑技术*, 2016(4):107.  
XING Xiaomo. New technology for lifting and inclination correction of the high-speed railway ballastless track [J]. *Railway Construction Technology*, 2016(4):107.
- [7] 温希华. 高速铁路CRTS II型板式无砟轨道纠偏技术研究[J]. *铁道勘察*, 2017, 43(1):6.  
WEN Xihua. Research on the deviation rectification technology for high-speed railway of CRTS II slab ballastless track [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2017, 43(1):6.
- [8] 刘学毅, 苏成光, 刘丹, 等. 轨道板与砂浆粘结试验及内聚力模型参数研究[J]. *铁道工程学报*, 2017, 34(3):22.  
LIU Xueyi, SU Chengguang, LIU Dan, *et al.* Research on the bond properties between slab and CA mortar and the parameters study of cohesive mode [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(3):22.
- [9] ZHANG Z, PAULINO G H. Cohesive zone modeling of dynamic failure in homogeneous and functionally graded materials[J]. *International Journal of Plasticity*, 2005, 21(6): 1195.
- [10] HU N, ZEMBA Y, OKABE T, *et al.* A new cohesive model for simulating delamination propagation in composite laminates under transverse loads[J]. *Mechanics of Materials*, 2008, 40(11): 920.
- [11] 董佳佳. CRTS II型板式轨道宽窄接缝温度荷载下受力及损伤行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.  
DONG Jiajia. Research on damage mechanism of wide and narrow joints in CRTS II slab track structure under temperature load [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [12] 刘钰, 赵国堂. CRTS II型板式无砟轨道结构层间早期离缝研究[J]. *中国铁道科学*, 2013, 34(4):1.  
LIU Yu, ZHAO Guotang. Analysis of early gap between layers of CRTS II slab ballastless track structure[J]. *China Railway Science*, 2013, 34(4):1.
- [13] 张广义. 砂浆充填层劣化对CRTS II型板式无砟轨道力学特性影响的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.  
ZHANG Guangyi. Study of the effect of cement asphalt mortar disease on mechanical properties of CRTS II slab ballastless Track [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [14] 朱胜阳, 蔡成标. 温度和列车动荷载作用下双块式无砟轨道道床板损伤特性研究[J]. *中国铁道科学*, 2012, 33(1):6.  
ZHU Shengyang, CAI Chengbiao. Research on the damage characteristics of double-block ballastless rack bed slab under temperature and vehicle dynamic loads [J]. *China Railway Science*, 2012, 33(1):6.

~~~~~

(上接第768页)

- WEI Li, CHAI Shouxi, CAI Hongzhou, *et al.* Physical and mechanical properties of wheat straw and unconfined compressive strength of reinforced inshore saline soil with wheat straw[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(3): 93.
- [13] 璩继立, 俞汉宁, 江海洋, 等. 棕榈丝与麦秸秆纤维加筋土无侧限抗压强度比较[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(5): 1216.  
QU Jili, YU Hanning, JIANG Haiyang, *et al.* Comparison of unconfined compressive strength of soil reinforced by palm fiber or wheat straw fiber[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(5): 1216.
- [14] 卢浩, 晏长根, 杨晓华, 等. 麦秆纤维加筋土的抗冲蚀性及其防护效果试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(10): 2138.  
LU Hao, YAN Changgen, YANG Xiaohua, *et al.* Experimental research on anti-eroding property and protection effect of reinforced soil with straw fibers[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(10): 2138.
- [15] 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.  
YU Pei, CHAI Shouxi, WANG Xiaoyan, *et al.* Reinforcement effect and engineering application problems of littoral saline soil reinforced with wheat straw[J]. *Journal of Tianjin Institute of Urban Construction*, 2010, 16(3):161.