

加筋材料对紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪强度的影响

刘春红^{1,2,3}, 韦杰^{1,2,3}, 史炳林¹, 李进林^{2,4}

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室,

重庆 401331; 3. 重庆师范大学装配式土地整治工程技术中心, 重庆 401331;

4. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041)

摘要: 选择三峡库区典型紫色土坡耕地埂坎为研究对象, 通过室内三轴不固结不排水试验(UU)研究加筋对埂坎土壤抗剪特征的影响。结果表明: (1) 3种试验材料加筋土均表现出土壤黏聚力随着加筋量的增加先增大后减小, 埂坎土壤黏聚力大小表现为: $c_{\text{麦壳}} > c_{\text{竹丝}} > c_{\text{稻秆}} > c_{\text{素土}}$ 。埂坎土壤黏聚力最大时, 麦壳、竹丝和稻秆的加筋量分别为 0.8%、0.5% 和 0.3%。加筋材料对土壤内摩擦角的影响不明显。(2) 3种加筋材料均能提升土壤抗剪强度。土壤极限主应力差随着加筋量的增加先增大后减小, 麦壳、竹丝和稻秆加筋土的极限主应力最大值均出现在最优加筋量处。4种试验围压下, 加筋埂坎土极限主应力差最大值均体现出 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{麦壳}} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{竹丝}} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{稻秆}} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{素土}}$ 。(3) 最优加筋量条件下, 3种加筋埂坎土壤试样在不同试验围压下的应力—应变曲线均呈硬化型。

关键词: 埂坎; 抗剪强度; 加筋土壤; 紫色土; 三峡库区

中图分类号: S152.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0103-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.017

Effects of Reinforcement Materials on Shearing Strength of Fieldriges on the Purple Soil Sloping Farmlands

LIU Chunhong^{1,2,3}, WEI Jie^{1,2,3}, SHI Binglin¹, LI Jinlin^{2,4}

(1. School of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 2. Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331; 3. Engineering Research Center for Pre-fabricated Land Consolidation, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 4. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Chengdu 610041)

Abstract: The typical fieldriges on the purple soil sloping farmlands in the Three Gorges Reservoir area were chosen to study the effects of reinforcement materials on soil shearing strength of fieldriges by laboratory unconsolidated undrained triaxial compression tests. The test results indicateds that: (1) The three tested materials showed that soil cohesion increased first and then decreased with the increasing of reinforcement amount. The cohesion of the fieldriges with different reinforced materials followed the order of $c_{\text{wheat husks}} > c_{\text{bamboo wool}} > c_{\text{rice straw}} > c_{\text{unreinforced soil}}$. When the cohesion of fieldriges soil was the largest, the reinforcement amount of wheat husks, bamboo wool and rice straw were 0.8%, 0.5% and 0.3%, respectively. But the effect of reinforcement materials on soil internal angle was not obvious. (2) Compared with unreinforced soil, the shearing strength of fieldriges soil with reinforcement materials all increased. As the reinforcement amount increased, the limit principal stress difference increased and then decreased, and the maximum of the limit principal stress difference all appeared at the optimal reinforcement amount of wheat husks, bamboo wool and rice straw respectively. Under the four kinds of confining pressures, the maximum value of the limit principal stress difference of reinforced fieldriges soil all showed that $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{wheat husks}} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{bamboo wool}} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{rice straw}} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{unreinforced soil}}$. (3) Under the optimal reinforcement amount, the deviatoric stress-strain curves of three reinforced fieldriges soil samples all displayed a hardening type.

Keywords: fieldrige; shearing strength; reinforced soil; purple soil; the Three Gorges Reservoir area

埂坎是重要的坡耕地水土保持措施,通过分割坡长和降低坡面坡度控制土壤侵蚀。埂坎稳定是其发挥水土保持效益的前提,而土壤抗剪强度又是决定埂坎稳定性的重要指标。自然条件下,埂坎土壤水分急剧耗散时裂隙发育将破坏土体结构,吸水饱和则使土体膨胀软化,这种劣化作用的累积能显著降低土壤抗剪强度,甚至会导致坡耕地埂坎严重变形,最终可能失稳垮塌^[1]。

通过加筋提高土体强度在工程实践中得到广泛的应用并取得良好的效果^[2-4]。有研究^[5-8]表明,稻草、麦秸秆、竹条、黄麻和植物根系等天然加筋材料成本低、分散性好,且强度高,与人工合成纤维相比,还具有掺料简单、可降解、不易形成软弱结合面及抗拉强度高等优点。筋材长度和质量加筋率是提高加筋土强度的主要影响因素,最优加筋长度和质量加筋率因加筋材料和土壤质地的不同而存在差异,如长度 20 mm、质量加筋率 0.2% 时,稻草加筋滨海盐渍土强度提高最明显^[9];再如加筋长度 20 mm、质量加筋率 0.25% 时,麦秸秆加筋滨海盐渍土的强度性能最好^[10]。此外,筋材形状及布设位置也会对加筋效果产生影响,如将横截面为 1/4 圆管状麦秸秆筋材布设在滨海盐渍土体的下半部分,能取得较好的强度提升效果^[11]。植物根系也具有加筋功能,相关研究^[12-15]报道较多,如草根加筋在紫色土区、黄土区、红土及赤红土区可显著增大土壤抗剪强度,含根量的增加能有效提高土体黏聚力,但对内摩擦角影响不大。

目前,有关紫色土坡耕地埂坎的研究多集中于埂坎结构与利用^[16]、埂坎入渗性能^[17]以及埂坎稳定性^[18]等方面,而有关加筋提高紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪强度的研究较少,不能有效指导埂坎的建设。本文利用不同加筋材料,通过设置不同的加筋量,进行埂坎土壤加筋模拟试验,研究加筋紫色土埂坎的抗剪强度特征,确定高效的加筋材料及其最优质量加筋率,可为三峡库区乃至长江上游高标准基本农田等工程中的埂坎建设提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为中性紫色土,于 2015 年 7 月取自忠县新政村土质埂坎。选取了 0.6, 0.8, 1.2 m 等高度的典型紫色土坡耕地土质埂坎,去除坎面上的杂草露出新鲜土壤面,然后自上而下均匀采集土样。每条埂坎采集 10 kg 土样,分为 5 点采集,每个点土样重约 2 kg,采集后将土样充分混匀。同时分别采 3 个环刀样,用于测定土壤干密度、孔隙度及颗粒组成等。经测定,埂坎土壤为粉壤土质地,颗粒组成为黏粒 6.2%,粉粒

78.1%,砂粒 15.7%,其干密度 1.32~1.62 g/cm³,总孔隙度 43.39%,采样完成后及时修复埂坎。最后将采集的土样带回实验室风干。将自然风干的土样,用木槌、滚筒碾磨,根据三轴试验要求通过 2 mm 的筛,充分混匀,测定风干土含水率,装入样品袋内待测土壤抗剪强度。

本着试验材料就地选取的原则,选用麦壳、稻秆和竹子 3 种加筋材料。

1.2 试验设计

根据三峡库区土坎的干密度和自然含水量情况,将土样的干密度定为 1.6 g/cm³,含水率定为 16%。试验涉及 3 种加筋材料,对照素土 1 组。质量加筋率太低时,加筋效果不明显;质量加筋率太高,加筋材料可能会在某处集中,破坏土的均匀性和整体性。参照魏丽等^[10]的研究,以质量加筋率(%)为标准,对加筋量进行设计。因稻秆密度小,同质量体积较大,所以稻秆加筋水平设置最低,稻秆和竹丝的加筋水平间隔为 0.1%,稻秆加筋水平设为 0.1%~0.6%,当加筋土强度与素土持平且有衰减,试验即停止。竹丝密度较稻秆大,竹丝加筋水平设为 0.1%~0.8%。虽然麦壳密度也较小,但较为细碎,麦壳加筋水平设置为 0.2%~2.0%,设计为间隔 0.2%,共计 10 个水平。竹丝和稻秆的加筋长度设计为 20 mm,采用混合加筋方式。稻秆经过切割处理成 1/4 圆管状。

1.3 测试方法

2016 年 7—8 月采用南京智龙科技开发有限公司生产的 TSZ-1 全自动三轴仪进行不固结不排水法(UU)剪切试验,三轴剪切试件的直径为 39.1 mm,高度为 80 mm,截面积为 12 cm²。

根据三轴试样目标含水率和干密度计算出所需风干土样,称取一定量的土样平铺于搪瓷盘内,并计算需水量,然后用喷壶均匀喷洒于土样上,在充分拌匀后装入盛土容器内密封,润湿 24 h,配制成含水率为 16%的散状土。

制样前加入处理好的筋材,按加筋水平称取一定量的筋材加入土样,手动拌和均匀。按照设计的干密度将配置好的土样分层装入饱和器内击实,各层土壤质量相等,接触面做刨毛处理,击完最后一层,将制作的试样两端用平口刀削平,并进行称量以确定是否与所需质量一致,相对误差控制在 1% 内。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999),试验主要参数设定为:轴向应变 20%,若无峰值,则取 15% 应变时对应的剪切峰值作为试样抗剪强度;对应的围压设定分别为 100, 200, 300, 400 kPa,剪切速率设定为 0.8 mm/min。

1.4 数据采集与处理方法

数据采集通过 TSZ-1 全自动三轴仪配套的土工

试验自动采集处理系统进行,试样的抗剪强度指标黏聚力(c)和内摩擦角(φ)根据 Mohr—Coulomb 定律 $\tau f = \sigma \cdot \tan \varphi + c$ 进行计算(σ 为破裂面的法向正应力)。

为了研究稻秆、竹丝和麦壳加筋对土壤黏聚力和内摩擦角的影响,设定: c_r 为加筋土的土壤黏聚力; c 为素土的土壤黏聚力; Δc 为加筋土的黏聚力增量; φ_r 为加筋土的土壤内摩擦角; φ 为素土的土壤内摩擦角, $\Delta \varphi$ 为加筋土的土壤内摩擦角变化率。土壤黏聚力增长率: $\Delta c = (c_r - c) / c$;内摩擦角变化率: $\Delta \varphi = (\varphi_r - \varphi) / \varphi$ 。

2 结果与分析

2.1 加筋量对埂坎土壤黏聚力和内摩擦角的影响

与素土相比,稻秆加筋土的黏聚力增幅明显,黏聚力为 61.11~94.31 kPa,增长 29.1%~54.3%。稻秆加筋土黏聚力随着稻秆含量的增加呈先增后减趋势(图 1a),最优加筋量值出现在 0.3%;竹丝加筋土的黏聚力增幅更为明显,黏聚力 61.11~113.71 kPa,增长率达 45.0%~86.1%,与稻秆加筋土一样,竹丝加筋土壤黏聚力随着竹丝含量的增加也呈先增后减趋势(图 1b),最优加筋量值出现在 0.5%;麦壳加筋土的黏聚力增幅最明显,黏聚力 61.11~127.43 kPa,增长率为 25.6%~108.5%。同样麦壳加筋土壤黏聚力也呈先增后减趋势(图 1c),但最优加筋量更高,约 0.8%。总体来看,3 种加筋土在最优加筋量以前土壤黏聚力随着加筋量的增加而增大,在最优加筋量以后,随着加筋量的增加黏聚力逐渐下降,黏聚

力随加筋量的变化基本符合二次曲线特征。

与素土相比,稻秆加筋土的土壤内摩擦角衰减较为明显,内摩擦角为 9.63°~14.14°,增量-2.5%~-31.9%。稻秆加筋土壤内摩擦角随稻秆加筋量的增加呈逐渐衰减趋势(图 1d),内摩擦角随稻秆含量的变化基本符合线性特征。同样竹丝加筋土的土壤内摩擦角衰减也较为明显,内摩擦角为 10.42°~14.14°,增量为-9.8%~-26.3%。竹丝加筋土壤内摩擦角随着竹丝加筋量的增加也呈整体衰减趋势(图 1e),但衰减幅度较小,内摩擦角随竹丝含量的变化线性特征不显著。而麦壳加筋土壤内摩擦角随麦壳量的增加呈先增后减趋势(图 1f),内摩擦角为 14.03°~17.03°,增量-5.7%~23.1%。土壤内摩擦角最大值出现在 0.8%,内摩擦角与麦壳含量间为中度相关。总体看来,3 种加筋材料对土壤内摩擦角的影响较小。

3 种材料加筋对内摩擦角的影响程度明显小于对土壤黏聚力的影响,这是由于加筋材料没有改变土壤本身的物理性质,如粒径大小、颗粒级配和颗粒特征,土壤颗粒之间的咬合作用并没有增强,材料表面相对光滑使得筋土之间无法形成较好的镶嵌作用^[10]。特别是稻秆表面最为光滑,使得土壤内摩擦角随着稻秆含量的增加而递减,而麦壳和竹丝加筋对土壤内摩擦角并无明显影响。因此,加筋对土壤的内摩擦角影响相对较小,这也表明加筋效果主要表现为土壤黏聚力的增加,对内摩擦角的影响较小。

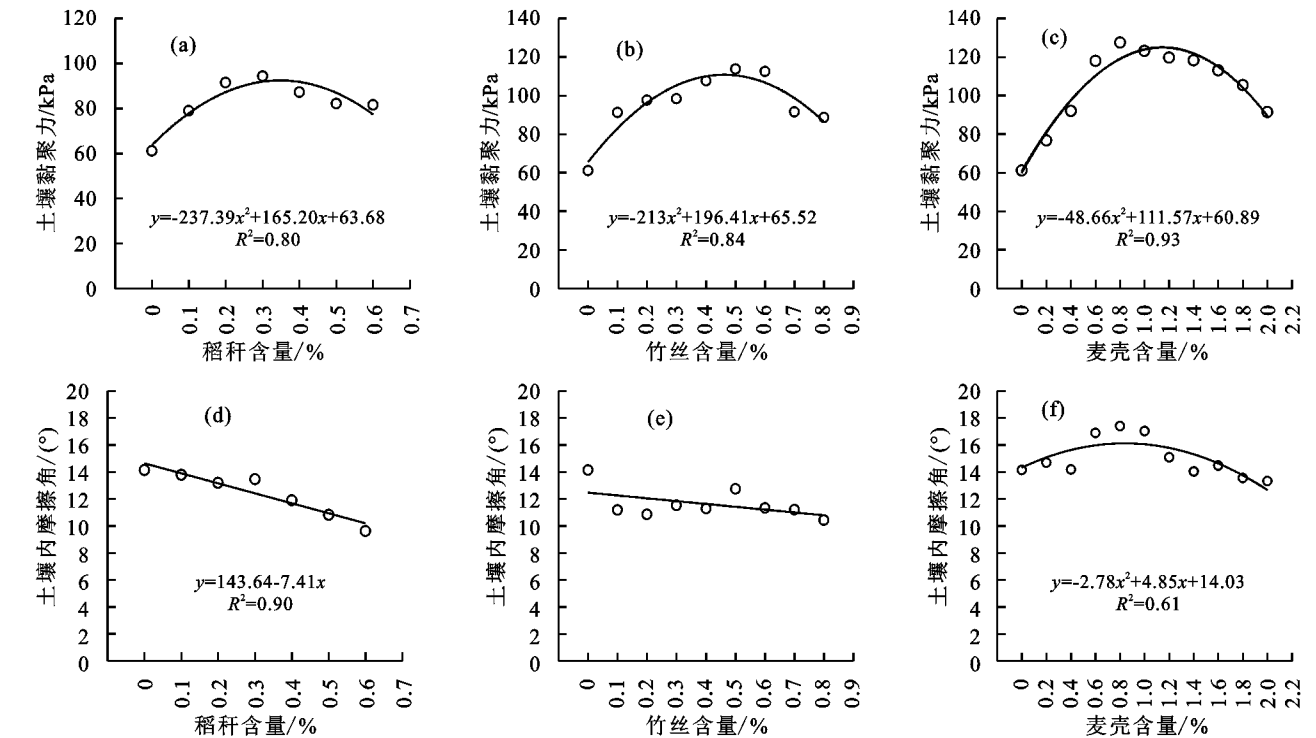


图 1 加筋对土壤黏聚力和内摩擦角的影响

综上,在 3 种加筋材料处理下的土壤黏聚力均大于素土,稻秆加筋土最优加筋量为 0.3%,黏聚力增

加 54.3%；竹丝最优加筋量为 0.5%，黏聚力增加较多，为 86.1%；麦壳加筋土最优加筋量为 0.8%，黏聚力增加最多，为 108.5%（图 3a）。不同加筋材料处理下埂坎土壤黏聚力大小排序为： $c_{\text{麦壳}} > c_{\text{竹丝}} > c_{\text{稻秆}} > c_{\text{素土}}$ ，说明 3 种加筋材料的加筋处理都达到较好的抗剪效果。在相同长度条件下，稻秆经切割处理，本身强度较低，而竹丝较稻秆拉伸强度高，表面较为粗糙，因此竹丝加筋土壤黏聚力大于稻秆加筋土壤黏聚力。

2.2 加筋量对埂坎土壤极限主应力差的影响

与素土相比，3 种加筋土的极限主应力差均有所增加，但不同围压下增幅不同。随围压增加极限主应力差逐渐增加，增幅逐渐降低（图 2）。稻秆、竹丝和麦壳 3 种加筋土的极限主应力差分别由低围压时的 204.1~

300.0, 204.1~326.6, 204.1~410.1 kPa 增加至高围压时的 348.6~482.0, 395.8~496.1, 409.9~665.2 kPa，而极限主应力差的增长率分别由低围压时的 8.1%~47.0%，27.9%~60.0%，46.8%~100.9% 降至高围压时的 -15.0%~17.6%，-3.4%~21.0%，16.7%~62.3%。4 种围压下，麦壳加筋土的极限主应力差增幅最大，为 46.8%~100.9%；其次是竹丝，为 27.9%~60.0%；最后是稻秆，为 8.1%~47.0%。

3 种加筋土在相同围压下的极限主应力差，均随加筋量的增加表现出先增后减的趋势（图 2a），并存在一个峰值，即最优加筋量（麦壳 0.8%，竹丝 0.5%，稻秆 0.3%），且 4 种围压下峰值均出现在最优加筋量处。极限主应力差随着加筋量的变化在各围压下基本符合二次曲线特征（表 1）。

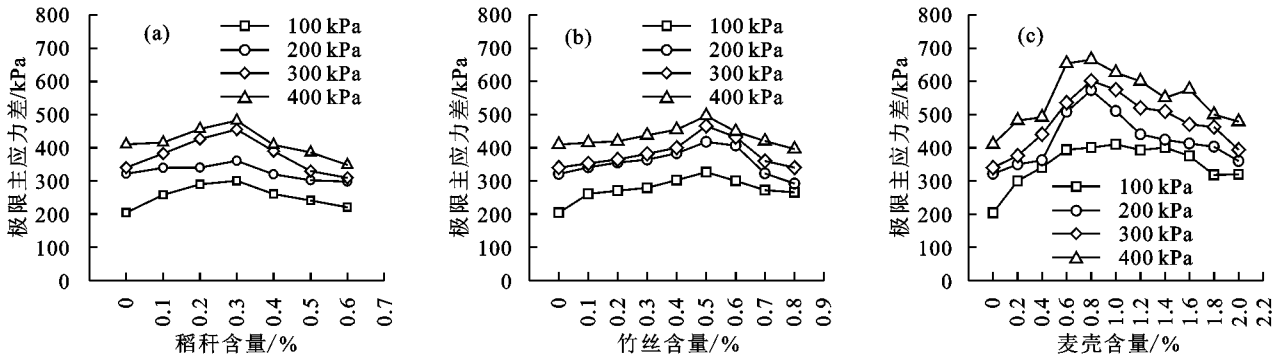


图 2 加筋材料对极限主应力差的影响
表 1 加筋土极限主应力差拟合方程

围压/kPa	稻秆加筋土		竹丝加筋土		麦壳加筋土	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
100	$y = -866.67x^2 + 514.86x + 211.64$	0.81	$y = -436.61x^2 + 413.21x + 209.29$	0.85	$y = -150.43x^2 + 335.41x + 225.77$	0.91
200	$y = -388.69x^2 + 175.18x + 323.88$	0.62	$y = -566.57x^2 + 450.71x + 303.92$	0.62	$y = -170.72x^2 + 350.00x + 310.05$	0.57
300	$y = -1217.74x^2 + 646.89x + 340.35$	0.77	$y = -513.58x^2 + 451.32x + 317.84$	0.47	$y = -203.76x^2 + 433.62x + 326.67$	0.84
400	$y = -871.79x^2 + 418.53x + 403.13$	0.72	$y = -379.65x^2 + 316.26x + 392.61$	0.49	$y = -196.00x^2 + 409.89x + 413.05$	0.74

选取 3 种加筋材料最优加筋量时的极限主应力差与素土相比，稻秆加筋土在 4 种围压下（100, 200, 300, 400 kPa）的最大强度增量依次为 47.0%，12.3%，33.8% 和 17.6%。竹丝加筋土的最大强度增量均高于稻秆加筋土，增量依次为 60.0%，30.1%，37.0% 和 21.0%。麦壳加筋土的最大强度增量最大，依次为 96.4%，78.7%，76.9% 和 62.3%（图 3b、3c、3d）。低围压下的递增速率均高于高围压下的递增速率，且随着围压的升高，递增速率逐渐降低。3 种材料加筋土高围压时均表现出递增速率缓慢，因在高围压的影响下试样侧向变形相对较小，加筋材料对试样侧向变形的牵制作用得不到充分发挥，所以加筋产生的效果比低围压情况下小一些。

2.3 不同加筋土的应力—应变关系比较

图 4 和图 5 分别为选取 3 种加筋土最优加筋量

（稻秆 0.3%，竹丝 0.5%，麦壳 0.8%）时的主应力差与轴向应变的关系曲线对比分析，可知 3 种加筋土主应力差与轴向应变曲线的变化趋势基本相同。当轴向应变 $< 4\%$ 时，加筋土和素土的主应力差与轴向应变曲线均近似于直线，且直线段的斜率随围压的增加而增大。3 种加筋土的主应力差应变曲线的斜率均大于素土。随着轴向应变的增大，主应力差逐渐增大。由图 4 可以看出，随围压的增加，加筋土和素土的主应力差均有明显增大；当加筋量一定时，不同围压下素土和加筋土的主应力差与轴向应变关系曲线均无峰值，随轴向应变的增加，主应力差不断增大，为应变硬化型。低围压下增长缓慢，呈现弱硬化型，高围压下硬化型相对明显；且围压越高，硬化型特征越明显。由图 4 还可看出，当轴向应变 $< 4\%$ 时，素土和加筋土的主应力差值很接近，特征曲线集中。4 种围

压下素土和加筋土的主应力差为 0.4~283.4 kPa;随着轴向应变的增大,应力—应变关系曲线的间距逐渐加大,素土和加筋土的主应力差提高为 246.0~

680.1 kPa。表明加筋作用在达到一定轴向应变时才能发挥出来。3 种加筋土中,麦壳加筋土的硬化特征最明显,说明麦壳加筋效果最好。

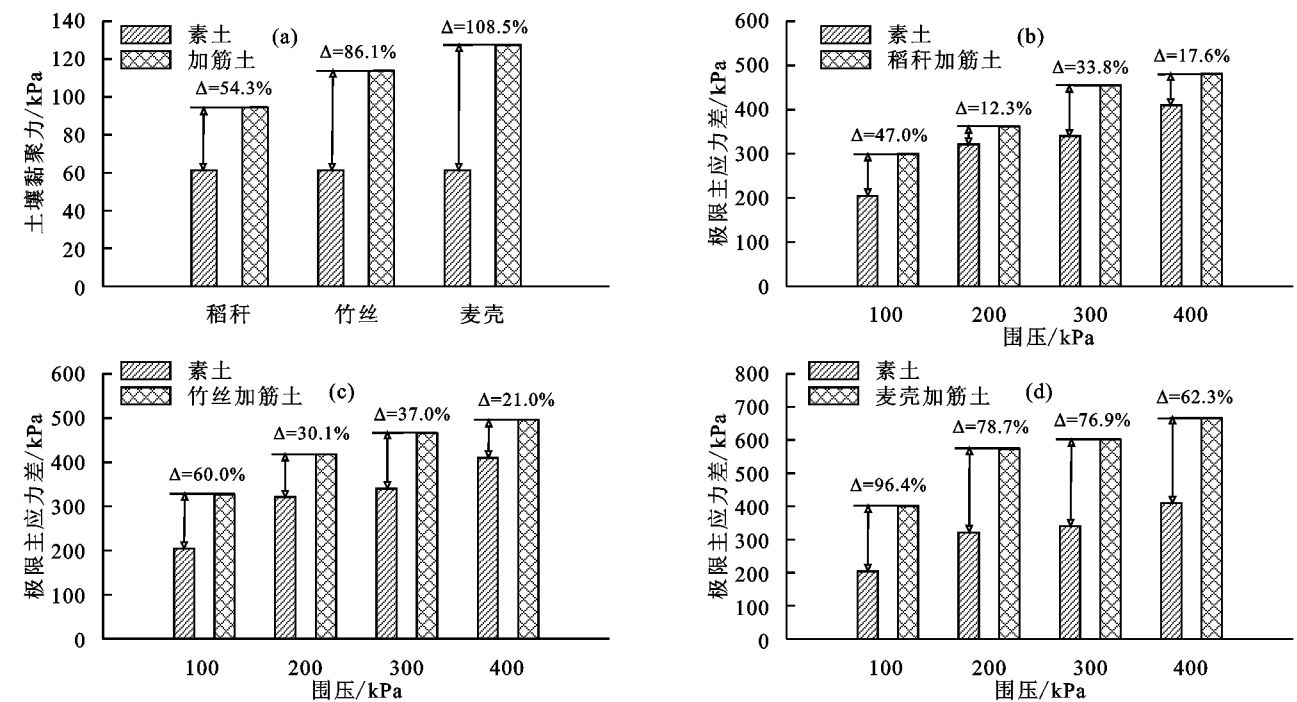


图 3 加筋材料对土壤强度的影响

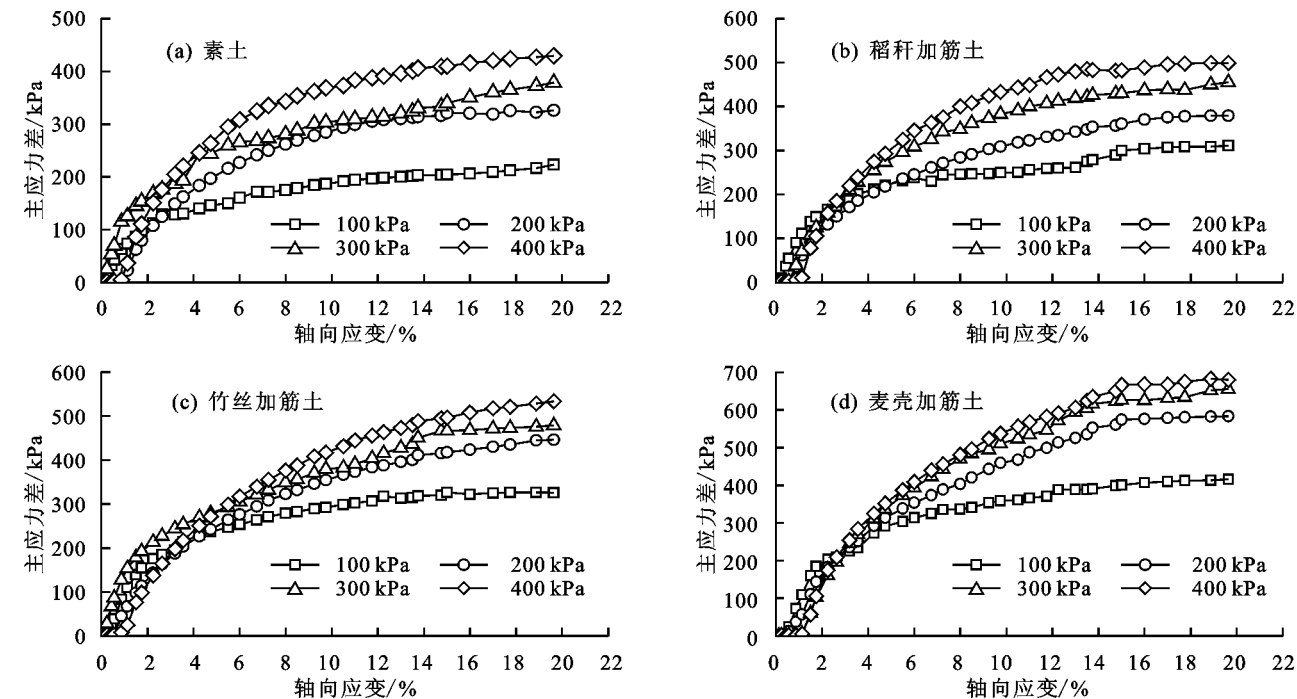


图 4 不同加筋材料的应力—应变关系比较

图 5 为围压一定时,3 种加筋土在最优加筋量时主应力差与轴向应变关系曲线。相同围压下均以麦壳加筋土的主应力差与轴向应变关系曲线最高,其次是竹丝,最后为稻秆。但围压为 100,300,400 kPa 时,竹丝和稻秆加筋土的主应力差与轴向应变关系曲线较接近,即围压为 100 kPa、轴向应变为 14%~20%时,稻秆的主应力差值略低于竹丝;围压为 300 kPa、轴向应变在 6%~14%时,稻秆的主应力差与竹

丝的相差不大;围压为 400 kPa、轴向应变在 6%~16%时,稻秆的主应力差与竹丝的差异不显著($p>0.05$),说明竹丝和稻秆加筋材料对埂坎土壤强度的提升效果相差不大。总之,3 种加筋土的最大强度值在 4 种围压下均体现为 $(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{麦壳}} > (\sigma_1-\sigma_3)_{\text{竹丝}} > (\sigma_1-\sigma_3)_{\text{稻秆}} > (\sigma_1-\sigma_3)_{\text{素土}}$,说明不同加筋材料均可提升土壤抗剪强度,其中,麦壳加筋提升土壤抗剪强度效果最好。

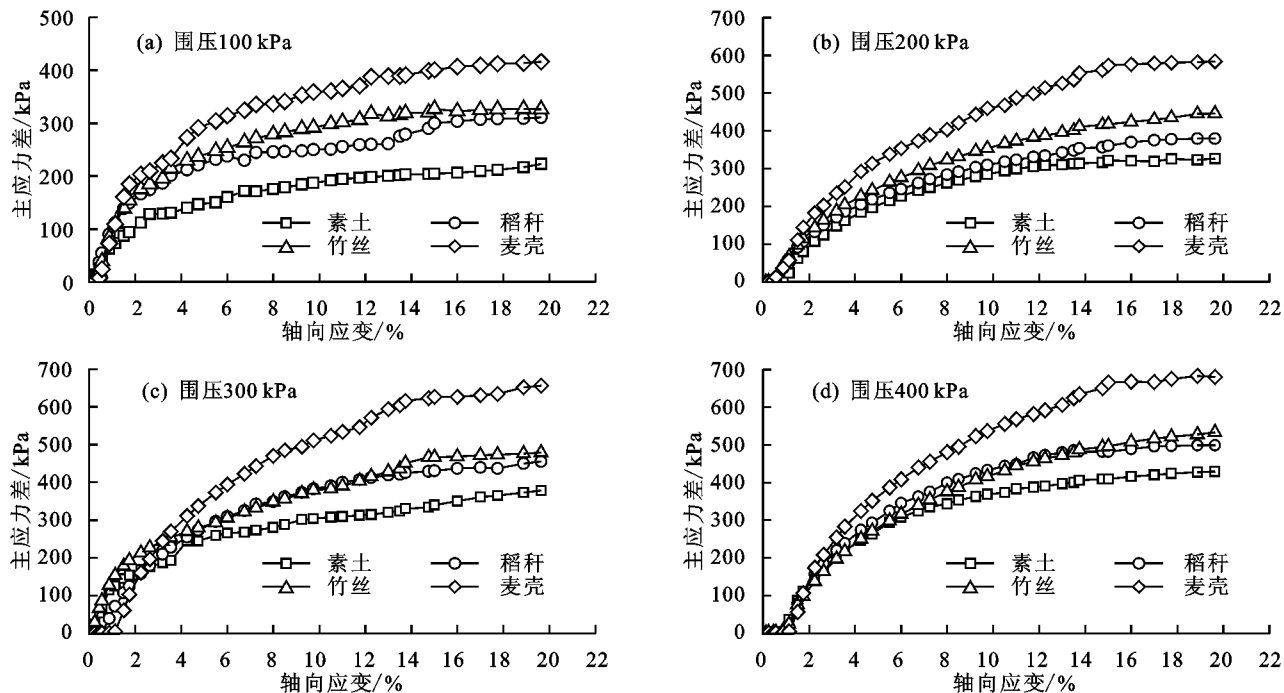


图 5 不同围压下加筋材料应力—应变关系特征

3 讨论

3.1 加筋材料对埂坎土壤抗剪强度的作用

试验范围内, 3 种加筋材料最大强度值在 4 种围压均体现为 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{麦壳}} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{竹丝}} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{稻秆}} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{素土}}$, 说明不同加筋材料均可提升土壤抗剪强度, 且均比素土强度有所提升, 但各类加筋材料之间提升强度水平各不相同, 其中麦壳加筋效果最好, 其次是竹丝, 稻秆加筋效果较差。加筋材料整体提升土壤黏聚力的主要原因为: 加筋材料在土壤孔隙中时, 一方面可以将材料周围的土壤颗粒凝聚在一起, 使土壤黏结力增大; 材料在土壤中被周围的土壤颗粒包围, 被包裹在土壤中, 相当于在土体中增加了微细筋材, 类似于钢筋锚固作用, 因此加筋材料能够产生加筋作用^[13]; 另一方面, 加筋土是筋材与土壤组成的复合体, 筋材与土壤共同受到外力作用, 当外力作用于加筋土, 筋土间会产生相互错动, 此时加筋材料对土壤颗粒约束力会增强, 使土壤的黏聚力提高^[10]。柔性加筋对土壤黏聚力有影响, 对土壤内摩擦角影响不大。3 种加筋材料所提升的土壤强度不同, 主要是由于材料本身的特性差异。本试验中, 麦壳由于片状结构, 能够更好地与土壤接触, 接触面积更大, 因此强度大; 竹丝细化处理后, 相比于稻秆, 表层较为粗糙, 可与土壤更好地接触, 而稻秆表层较为光滑, 因此提升土壤强度相对较弱。由于本试验中加筋材料均为混合添加, 因此大量筋材在土壤中随机分布, 并且相互交织成网, 当其中一根筋材受到压力作用时, 必定牵动其他筋材共同受力, 从而形成三维受力网状结构, 使得外力荷载分布到整个试样, 提升了

筋材的拉筋效果, 筋材的增强方式主要以筋材三维网加筋作用为主^[19]。

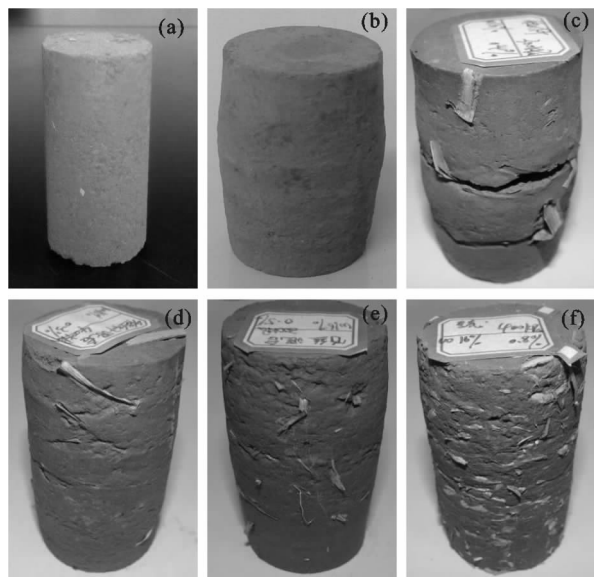
3.2 加筋材料及加筋方式对埂坎土壤应变特性的影响

不同加筋材料和加筋方式在试验后的破坏形态各不相同(图 6), 由于其他加筋量试样破坏形态基本相似, 在此仅选取了 3 种材料加筋土壤强度最高时的试样, 即稻秆加筋量为 0.3%、竹丝加筋量为 0.5% 和麦壳加筋量为 0.8%。图 6a 为素土试验前试样形态, 图 6b 为素土试验后形态, 可以看出试样变形为中间大, 两头小, 整体呈现“鼓”形。这是由于试样的上下两端受到设备轴向两端的约束作用, 而试样中部受到的约束作用最小, 因此中部发生横向鼓胀最为明显^[15]。图 6d、图 6e 和图 6f 分别为加筋土试样的破坏形态, 试样受到剪切破坏后, 整体均匀压缩, 腰部和两端的变形量基本相当, 整体较素土横向变形明显减小。这在一定程度上说明筋材对土壤的约束作用, 混合均匀的筋材形成的三维网状结构能够使得外力荷载分布到整个试样, 提升筋材的拉筋效果, 使得筋土复合体成为一个受力整体, 共同受到外力作用, 共同变形。筋材通过近似锚固作用和筋材受到的拉力与土体受到的压力结合起来, 共同提高土体强度, 因此加筋试样破坏形态显得更为标准。

本试验还研究加筋方式对土壤强度的影响, 以稻秆加筋为例, 将试样分为 3 层, 在试样的 1/3 和 2/3 处, 分别放置稻秆, 分层加筋, 但试验发现在加筋处形成明显的破坏面, 试样直接断裂为 3 段(图 6c)。本结果与陈昌富等^[20]对水平加筋可提高土体抗剪强度的结果较为一致。在水平加筋土样表面施加荷载时,

土体和筋材都发生变形,加筋材料与土之间产生较大的摩阻力,限制加筋土的变形,相当于在土样侧面施加约束力,在筋土交界面上产生一个平行于界面的切向力($\Delta\sigma_3$),提高土体的抗剪强度;且水平加筋层数越多,加筋土强度提高越大^[21]。而本研究分层加筋试样产生的破裂面,是因为稻秆的弹性模量高于土体的弹性模量,筋材和土体之间产生相互错动或有相互错动趋势,土体与稻秆筋材间产生摩擦力。但因稻秆表面较光滑,其与土体间的摩擦力较小,当土样表面施加的主应力(σ_1)不断增大时,超出土体侧面约束力的范围,导致试样破坏,说明稻秆分层加筋不能很好地提升土壤强度。在实际埂坎筑造中均匀混合加筋最为方便,具体可实施性更强,且稳定坚固,对于新型埂坎的建造具有参考作用。

在库区工程建设中的加筋材料类型比较多,还有麦秸秆、稻壳和聚丙烯纤维等,虽然与稻秆和麦壳较为接近,毕竟物理特征仍有差异,加筋材料类型有待拓展深化。加筋材料不同对土壤强度的提升作用不同,但同种加筋材料在不同加筋方式下强度有所差异。本研究采用均匀混合加筋方法,初步探究稻秆分层加筋对提升土壤强度的影响,但还有垂直和交叉等多种加筋方式,以及筋材长度都有待进一步研究。



注:a为素土试验前;b为素土试验后;c为稻秆分层加筋;d为稻秆混合加筋;e为竹丝混合加筋;f为麦壳混合加筋。

图6 不同加筋材料和加筋方式试样破坏形态

4 结论

(1)在试验范围内,随着加筋量的增加,埂坎土壤黏聚力呈先增大后减小趋势。黏聚力最大时,麦壳、竹丝和稻秆的加筋量分别为0.8%、0.5%和0.3%。相比而言,麦壳提高埂坎土壤黏聚力的效果最好,其次为竹丝。总体来看,加筋材料对埂坎土壤内摩擦角的影响不明显。

(2)3种加筋材料均能明显增强埂坎土壤抗剪强度,其极限主应力差随加筋量的增加呈先增大后减小趋势。4种试验围压下,加筋埂坎土壤极限主应力差最大值均体现为 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{麦壳}} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{竹丝}} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{稻秆}} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{素土}}$ 。麦壳、竹丝和稻秆的最优加筋量分别为0.8%、0.5%和0.3%。

(3)最优加筋量条件下,3种加筋埂坎土壤其试样在不同试验围压下的应力—应变曲线均呈硬化型。麦壳加筋土对土壤抗剪强度提升效果最好,竹丝加筋土和稻秆加筋土对埂坎土壤强度的提升效果相差不大。

参考文献:

- [1] 史东梅,蒋平,何文健,等. 紫色土坡耕地生物埂土壤抗剪强度对干湿作用的响应[J]. 农业工程学报,2016,32(24):139-146.
- [2] Maji V B, Sowmiya V S, Robinson R G. A simple analysis of reinforced soil using equivalent approach[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering,2016,2(2):16.
- [3] Kanchi G M, Neeraja V S, Sivakumar Babu G L. Effect of anisotropy of fibers on the stress-strain response of fiber-reinforced soil[J]. International Journal of Geomechanics,2014,15(1):1-6.
- [4] Botero E, Ossa A, Sherwell G, et al. Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET) [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015,43(4):363-369.
- [5] 马强,邢文文,李丽华,等. 竹条加筋土的大尺寸直剪试验研究[J]. 长江科学院院报,2017,34(2):69-74.
- [6] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍. 林木根系的加筋作用试验研究[J]. 水土保持研究,2008,15(2):99-103.
- [7] Zhang C B, Chen L H, Liu Y P, et al. Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength[J]. Ecological Engineering,2010,36(1):19-26.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 魏丽,柴寿喜,蔡宏洲,等. 麦秸秆加筋滨海盐渍土的抗剪强度与偏应力应变[J]. 土木工程学报,2012,45(1):109-114.
- [11] 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.
- [12] 蒲玉琳,谢德体,倪九派,等. 紫色土区植物篱模式对坡耕地土壤抗剪强度与抗冲性的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(5):934-945.

- several levels[J]. *Catena*, 2002, 47(2):133-149.
- [4] 薛斌, 黄丽, 鲁剑巍, 等. 连续秸秆还田和免耕对土壤团聚体及有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1):182-189.
- [5] Nouwakpo S K, Song J L, Gonzalez J M. Soil structural stability assessment with the fluidized bed, aggregate stability, and rainfall simulation on long-term tillage and crop rotation systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178:65-71.
- [6] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1):340-347.
- [7] 李娟, 韩露昌, 陈超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1):248-253.
- [8] 温磊磊, 郑粉莉, 沈海鸥, 等. 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3):489-498.
- [9] Li G L, Fu Y, Li B Q, et al. Micro-characteristics of soil aggregate breakdown under raindrop action[J]. *Catena*, 2017, 162:354-359.
- [10] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 天然林转换成人工林对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6):177-182.
- [11] 唐骏, 党廷辉, 薛江, 等. 植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(16):5067-5077.
- [12] 李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 等. 土壤团聚体与微生物相互作用研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(9):1625-1632.
- [13] Ussiri D A N, Lal R. Method for determining coal carbon in the reclaimed minesols contaminated with coal[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(1):231-237.
- [14] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3):627-633.
- [15] 杨培岭, 罗远培, 石元春, 等. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20):1896-1899.
- [16] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution[C]// Klute, A. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. American Society of Agronomy, Madison, 1986:425-442.
- [17] 李华, 李永青, 沈成斌, 等. 风化煤施用对黄土高原露天煤矿区复垦土壤理化性质的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5):1752-1756.
- [18] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J]. *地理研究*, 2002, 21(6):700-706.
- [19] Young I M, Crawford J W, Rappoldt C. New methods and models for characterizing structural heterogeneity of soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 61:33-45.
- [20] 陈山, 杨峰, 林杉, 等. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5):211-216.
- [21] 闵凡飞, 赵晴, 李宏亮, 等. 煤泥水中高岭土颗粒表面荷电特性研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(2):284-290.
- [22] 杨静, 李福勤, 邵立南, 等. 矿井水中悬浮物特征及其净化关键技术[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2008, 27(3):458-460.
- [23] 刘平, 张强, 程滨, 等. 电厂煤粉尘沉降特征及其对周边土壤主要性质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010(5):21-24.
- [24] Ye L P, Tan W F, Fang L C, et al. Spatial analysis of soil aggregate stability in a small catchment of the Loess Plateau, China: I. Spatial variability[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 179:71-81.
- [25] 朱秋丽, 王纯, 严锦华, 等. 施加秸秆与废弃物对茉莉园土壤团聚体及碳氮磷含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4):191-197.
- (上接第109页)
- [13] 张兴玲, 胡夏嵩. 青藏高原东北部黄土区草本植物根系加筋土的抗剪特性[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(4):185-188.
- [14] 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):1405-1410.
- [15] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(10):2041-2045.
- [16] 李进林, 韦杰. 三峡库区坡耕地埂坎类型、结构与利用状况[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(1):229-233.
- [17] 黎娟娟, 韦杰, 李进林, 等. 紫色土坡耕地土质埂坎分层入渗试验研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4):69-74.
- [28] Wei J, Shi B, Li J, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: A case study in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Catena*, 2018, 166:124-133.
- [19] 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):610-614.
- [20] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的护坡机理及强度准则试验研究[J]. *公路工程*, 2006, 31(2):14-17.
- [21] 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]. *天津城建大学学报*, 2010, 16(3):161-166.