

DOI: 10.11779/CJGE2021S1033

加筋材料改良黄土强度特性的试验研究

何玉琪¹, 廖红建^{*1}, 董琪², 牛波¹, 刘虎¹

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 陕西科技控股集团有限责任公司, 陕西 西安 710003)

摘要:对土工格栅加筋重塑黄土进行三轴固结不排水剪切试验,探讨了加筋层数与加筋方式对黄土强度特性的影响。试验结果表明,黄土试样在经过水平加筋后强度提升,倾斜加筋后强度下降。水平加筋时,土样强度会随着加筋层数的增多而增加,存在一个最优加筋层数(间距),当超过这一加筋层数时,土体强度改善效果不明显;倾斜加筋时,加筋角度为 0° 时,黄土试样的抗剪强度最大,当加筋倾角接近于 $45^\circ + \varphi/2$ 时,试样的抗剪强度最小。筋材的作用在黄土试样轴向应变达到3%~5%左右时才体现出来,说明只有当达到足够大的变形条件时,筋材才会发挥其抗拉伸力从而起到提升土体抗剪强度的作用。

关键词:重塑黄土;水平加筋;倾斜加筋;三轴试验;抗剪强度

中图分类号:TU43

文献标识码:A

文章编号:1000-4548(2021)S1-0181-05

作者简介:何玉琪(1993—),男,博士研究生,主要从事岩土本构关系及数值模拟研究。E-mail: geotech_hyq@163.com。

Experimental study on strength characteristics of geogrid-reinforced loess

HE Yu-qi¹, LIAO Hong-jian^{1*}, DONG Qi², NIU Bo¹, LIU Hu¹

(1. School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Shaanxi Science and Technology Holding Group, Xi'an 710003, China)

Abstract: A series of consolidated undrained shear tests are carried out on geogrid-reinforced remolded loess samples, the effects of geogrid layers and reinforcement method on the strength characteristics of loess are investigated. The test results show that the loess strength increases under horizontal reinforcement layers, however, it decreases under inclined reinforcement condition. In case of horizontal reinforcement, the strength of the loess will increase as the reinforcement layers increase, moreover, there is an optimal reinforcement layer (reinforcement spacing), when the optimal layer is exceeded, the improvement effect is inconspicuous. The inclined reinforcement tests show that when the reinforcement angle is 0° , the loess sample shows the largest shear strength, however, the smallest strength is observed while the inclination angle of reinforcement reaches $45^\circ + \varphi/2$. The reinforcement effect will only play a role when the axial strain of the loess sample reaches about 3% ~ 5%, indicating that a sufficient deformation condition is required to improve the strength of the soil, in this case, the reinforced material will show its stretchability to improve the shear strength of the soil.

Key words: remolded loess; horizontally reinforced loess; inclined reinforced loess; triaxial test; shear strength

0 引言

加筋土技术是应用较为广泛的土体加固技术,通过把特定的材料添加到土体中来提高土体的整体强度,是一种简单有效的土体增强措施^[1-5]。早期加筋材料多为土工织物,如 Gray^[6]用土工布作为加筋材料,研究了三轴压缩条件下加筋砂土的强度及变形特性,Haeri等^[7]利用土工布加筋砂土的三轴试验,研究了加筋层数和加筋类型对砂土强度影响。随着科技的发展,各种土工合成材料因其具有更高的强度和延展性能而被作为加筋材料,黄仙枝等^[8]研究了土工带加筋碎石土的抗剪强度,提出了土工带加筋土的抗剪强度表达式,Infante等^[9]利用土工格栅作为加筋材料研究了土工格栅类型对砂土强度特性的影响。近几年,随

着绿色环保理念的倡导,一些天然加筋材料被用于土体加筋材料,如陈昌富等^[10]利用室内三轴试验研究了草根加筋土的强度特性,李丽华等^[11]开展了稻壳灰加筋土的强度特性试验,结果表明10%~15%稻壳灰比例下,加筋稻壳灰混合土抗剪强度最优。

目前研究多是围绕加筋层数、加筋材料及筋材形状等因素开展的,鉴于此,本文对加筋重塑黄土开展了固结不排水三轴剪切试验,研究了水平加筋及倾斜加筋对黄土强度特性的影响。

基金项目:国家自然科学基金项目(51879212,41630639);陕西省国际科技合作计划重点项目(2019KWZ-09)

收稿日期:2020-12-15

***通信作者**(E-mail: hjliao@xjtu.edu.cn)

1 加筋黄土强度特性试验

1.1 试验材料

试验所用黄土样取自西安市某基坑内,其物理性质参数如表 1 所示,粒径级配如图 1 所示。

表 1 黄土物理性质指标

Table 1 Physical properties of test loess

天然密度 /(g·cm ⁻³)	天然 含水率/%	塑性 指数	塑限 /%	液限 /%	相对 密度
1.52	16.6	19.5	16.2	35.7	2.695

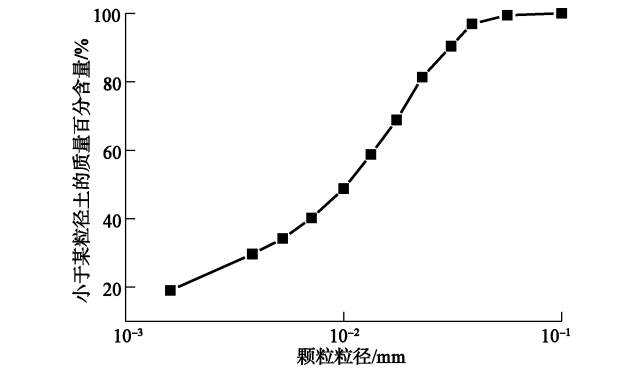


图 1 试验黄土粒径级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of test loess

1.2 试样制备

首先把取来的黄土样碾碎烘干,然后,过 2 mm 直径标准筛,将过筛的干土与水均匀混合,控制制样含水率为 16%,将湿土再次过 2 mm 标准筛以减少土体的结团现象,二次过筛后的土样用塑料膜密封,放置 24 h 后取出制样。

1.3 试验方案

用全自动三轴试验仪开展一系列固结不排水试验,探讨水平加筋层数(一层、二层、三层)和倾斜加筋角度(0°,20°,35°,50°,65°,80°)对黄土强度特性的影响。

水平加筋时,筋材的 3 种添加位置如图 2 所示。倾斜加筋时,首先制作具有不同倾斜角度的模具,然后将磨具套入制样器中开始制样。倾斜加筋模具和筋材布置示意图分别如图 3,4 所示。

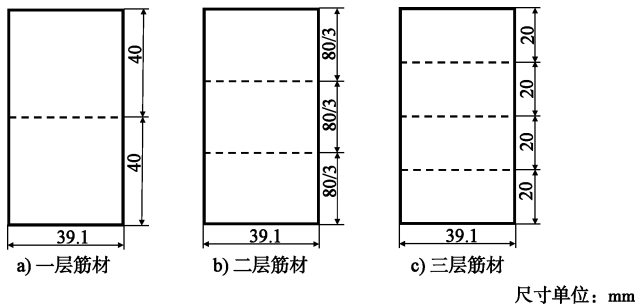


图 2 水平加筋示意图

Fig. 2 Diagram of horizontally reinforced loess



图 3 不同倾角制样模具

Fig. 3 Sample moulds with different inclination angles

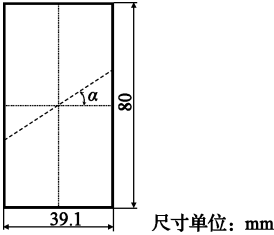


图 4 倾斜加筋示意图

Fig. 4 Diagram of inclined reinforced loess

试样制备结束后,依次开展饱和,固结,剪切试验。本文饱和标准为饱和度达到 0.9 以上,固结时间均取 24 h,剪切结束标准为轴向应变达到 20%。

2 试验结果分析

2.1 水平加筋三轴试验结果

图 5 为素黄土的偏应力-轴向应变曲线,结果表明,素黄土都呈现出明显的应力硬化特征,且随着围压增大,试样硬化程度变大,土体强度明显提高。

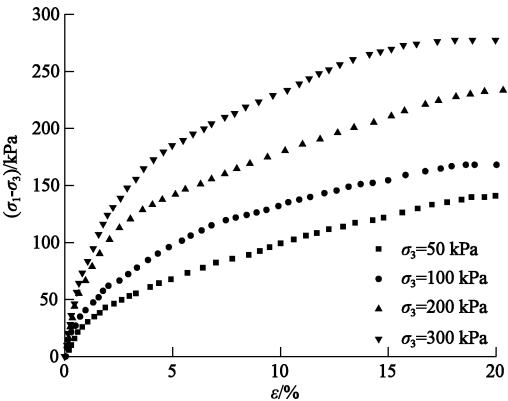


图 5 素黄土偏应力-轴向应变曲线

Fig. 5 Deviator stress-axial strain curves of remolded loess

图 6 为加筋黄土的应力应变曲线:①1 层,2 层加筋对土体强度的提升显著,但 3 层加筋与 2 层加筋效果相似;②加筋材料在轴向应变达到 3% ~ 5% 时开始发挥作用,说明在小应变条件下,筋材并不起到提升土体强度的作用,只有当达到足够的变形条件时,筋材才会发挥作用从而起到提升土体整体抗剪强度的作用。

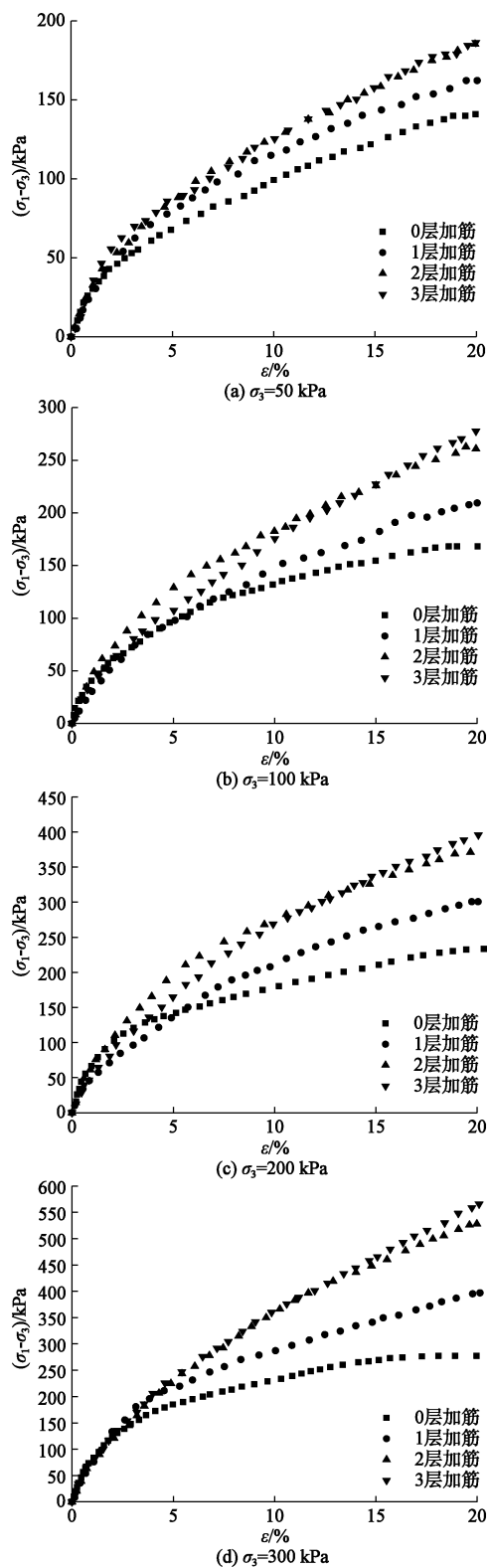


图6 水平加筋黄土的偏应力-轴向应变曲线

Fig. 6 Deviator stress-axial strain curves of horizontally reinforced loess

为研究加筋间距(层数)对土体的强度的影响,采用 Yang 等^[2]定义的加筋强度应力比(SR)来进行定量描述:

$$SR = \frac{(q_{\max})_{\text{re}}}{(q_{\max})_{\text{unre}}}, \tag{1}$$

式中, $(q_{\max})_{\text{re}}$ 和 $(q_{\max})_{\text{unre}}$ 分别为加筋土和素土的最大偏应力,本文取 15% 轴向应变时的偏应力。

图 7 表明,应力比 SR 随着加筋间距的增加而减小,但 2 层(间距 26.7 mm)和 3 层加筋(间距 20 mm)的 SR 值极为接近,说明改善效果并不是层数越多越好,而是存在一个最优加筋层数,当超过这一加筋层数时,土体强度改善效果不明显。本文的最优加筋加筋间距为 26.7 mm,对应于 2 层加筋。

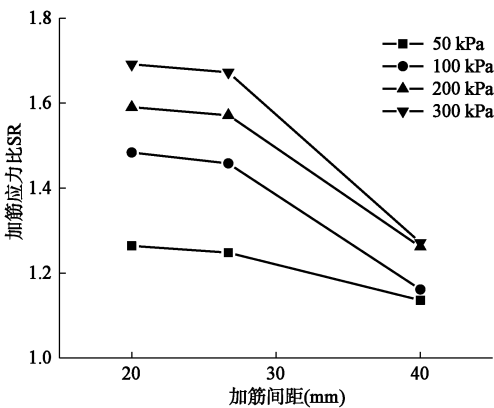


图7 加筋应力比与加筋间距关系

Fig. 7 Relationship between stress ratio and reinforcement spacing

取轴向应变为 15% 时所对应的偏应力为破坏应力,由图 8 可见,随着加筋层数的增加,土体的破坏应力增大,随着围压的增大,筋土作用增强,故加筋土与素土的轴向破坏应力差变大。水平加筋土体的强度参数如表 2 所示。

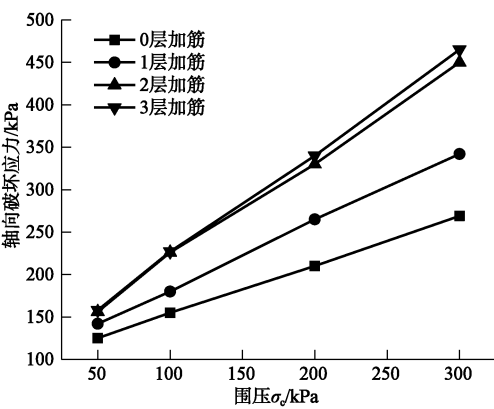


图8 水平加筋土样的轴向破坏应力

Fig. 8 Axial failure stresses of horizontally reinforced loess

表 2 水平加筋土样的抗剪强度指标

Table 2 Shear strength indexes of horizontally reinforced loess		
加筋层数 n	黏聚力/(kPa)	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
0	38.5	12.8
1	37.0	16.7
2	38.5	21.0
3	39.7	21.1

2.2 倾斜加筋三轴试验结果

图 9 为倾斜加筋土样的偏应力-轴向应变曲线,结果表明,0°和 80°加筋时同一轴向应变所对应的偏应力最大,50°加筋时,偏应力值最小。

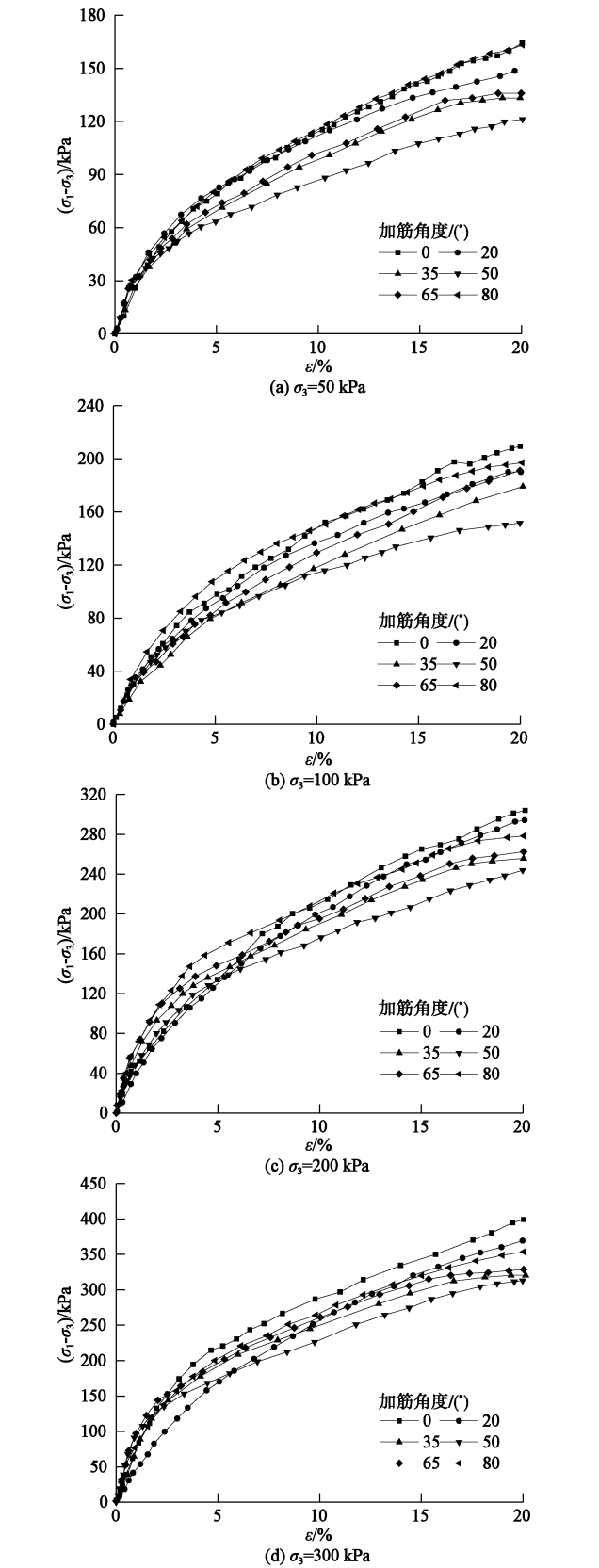


图 9 倾斜加筋黄土的偏应力-轴向应变曲线
Fig. 9 Deviator stress-axial strain curves of inclined reinforced loess

表 3 倾斜加筋土样的抗剪强度指标		
Table 3 Shear strength indexes of inclined reinforced loess		
加筋角度/(°)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)
0	38.0	16.7
20	35.9	16.2
35	30.8	15.0
50	27.0	14.5
65	33.1	15.7
80	35.6	15.0

图 10,11 为倾斜加筋时的轴向破坏应力曲线:土体强度会随着加筋角度的增加呈现出先减小后增加的关系,水平加筋(0°)的土体强度最大,50°加筋时强度最小。根据莫尔库伦定律,土体的破坏面出现在 $45^\circ + \varphi/2$ 面上,故 50°加筋相当于促进了破坏面的形成,使得整体强度会下降。倾斜加筋时所对应的强度参数如表 3 所示,表明强度下降的原因主要是黏聚力发生了改变,其随角度的变化规律如图 12 所示,可知当加筋倾角为 50°时,黏聚力最小。

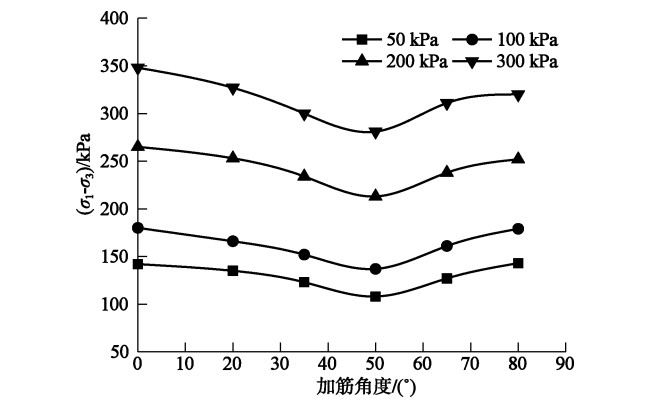


图 10 轴向破坏应力与加筋角度关系
Fig. 10 Relationship between axial failure stress and reinforcement angle

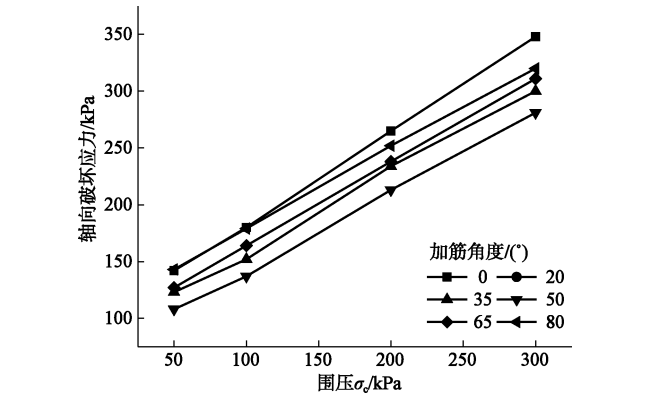


图 11 倾斜加筋土样的轴向破坏应力
Fig. 11 Axial failure stress of inclined reinforced loess

3 合理布筋方式机理分析

图 13 为素土和水平加筋试样的破坏形态图,可知,

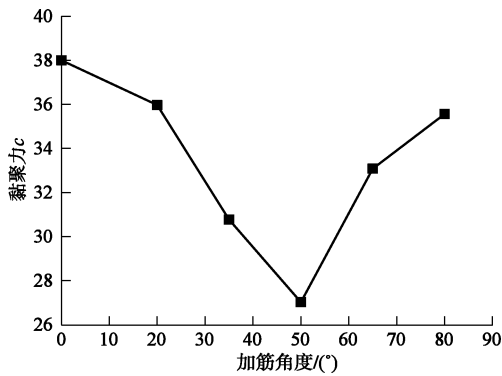


图 12 黏聚力与加筋角度关系

Fig. 12 Relationship between cohesion and reinforcement angle
素土受剪破坏时会形成一条与水平方向呈 $45^\circ + \varphi/2$ 的剪切带,水平加筋后,破坏面在扩展的过程中受到筋材的阻碍作用,故不能形成贯通剪切带,同时使得土体内部的剪应力重新均匀分布,土体的抗剪强度得到提高。图 14 为素土和 50° 倾斜加筋试样的破坏形态图,表明 50° 倾斜加筋试样破坏后的剪切带更为明显,说明筋材倾斜放置时会加剧土体受剪破坏时内部破坏面的形成,使土体的抗剪强度下降。因此,如果在土体产生最大剪应力的范围内合理加筋,会阻止土体剪切破坏时内部裂纹的扩展和贯通剪切带的形成,土体的稳定性将会提高。

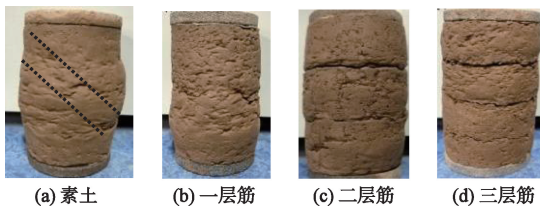


图 13 剪切破坏后的素土与水平加筋土试样

Fig. 13 Failure samples of remolded loess and horizontally reinforced loess

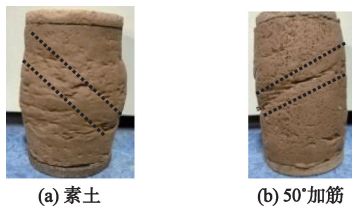


图 14 剪切破坏后的素土与 50° 倾斜加筋土试样

Fig. 14 Failure samples of remolded loess and 50° inclined reinforced loess

4 结 论

本文开展了土工格栅加筋黄土的三轴固结不排水剪切试验,研究了水平加筋和倾斜加筋对黄土强度特性的影响,得出以下 3 点结论。

(1) 水平加筋时,黄土强度增加,但并不是层数越多越好,而是存在一个最优加筋层数,当超过这个层数时,黄土强度提升不明显。

(2) 筋材在 $3\% \sim 5\%$ 轴向应变时才开始发挥作用,说明只有当达到足够的变形条件时,加筋材料才会发挥其作用从而提升土体的抗剪强度。

(3) 倾斜加筋时,黄土强度下降,当加筋角度接近于 $45^\circ + \varphi/2$ 时,土体的强度最小,其原因是倾斜加筋相当于促进了破坏面的形成。

参考文献:

- [1] KHEDKAR M S, MANDAL J N. Behaviour of cellular reinforced sand under triaxial loading conditions [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2009, 27(5): 645 – 658.
- [2] YANG K H, YALEW W M, NGUYEN M D. Behavior of geotextile-reinforced clay with a coarse material sandwich technique under unconsolidated-undrained triaxial compression [J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(3): 0415083.
- [3] 保华富,周亦唐,赵 川,等. 聚合物土工格栅加筋碎石土试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 217 – 221. (BAO Hua-fu, ZHOU Yi-tang, ZHAO Chuan, et al. Study on geogrid reinforced stone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 217 – 221. (in Chinese))
- [4] 吴景海,王德群,陈 环. 土工合成材料加筋砂土三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 199 – 204. (WU Jing-hai, WANG De-qun, CHEN huan. Study on geosynthetic reinforced sand by triaxial compression test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 199 – 204. (in Chinese))
- [5] 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 Shou-xi, WANG Pei, WANG Xiao-yan. 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))
- [6] GRAY D H, AL-REFEAI T. Behavior of fabric-versus fiber-reinforced sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(8): 804 – 820.
- [7] HAERI S M, NOORZAD R, OSKOOROUCHI A M. Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2000, 18(6): 385 – 402.
- [8] 黄仙枝,白晓红. 土工带加筋碎石土的抗剪强度特性研究 [J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1464 – 1468. (HUANG Xian-zhi, BAI Xiao-hong. Study of shear strength characteristics of geobelt reinforced crushed gravel soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1464 – 1468. (in Chinese))
- [9] INFANTE D J U, MARTINEZ G M A, ARRUA P A, et al. Shear strength behavior of different geosynthetic reinforced soil structure from direct shear test [J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2016, 2(2): 1 – 16.
- [10] 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. (CHEN Chang-fu, LIU Huai-xing, LI Ya-ping. Study on grassroots-reinforced soil by laboratory triaxial test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2041 – 2045. (in Chinese))
- [11] 李丽华,余肖婷,肖衡林,等. 稻壳灰加筋土力学性能研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2168 – 2178. (LI Li-hua, YU Xiao-ting et al. Mechanical properties of reinforcement about rice husk ash mixed soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2168 – 2178. (in Chinese)).

(编校:孙振远)