

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.01.013

土工格栅加筋砂土的三轴试验研究

吴黎明¹, 朱亚林^{1,2}, 许倩¹, 陈清^{1,2}, 汪亦显^{1,2}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要:为研究土工格栅的加筋机理,文章设计了3种不同网格尺寸的土工格栅,采用应变控制式三轴仪进行加筋砂土的不固结不排水三轴剪切试验,探究土工格栅网格尺寸、加筋层数及围压对砂土强度特性的影响。试验结果表明:未加筋时,砂土主要表现为中上部鼓胀破坏,随着加筋层数的增加,砂土的破坏形态依次转变为中部鼓胀破坏和剪切破坏;素砂和加筋砂土的偏应力-轴向应变曲线表现为应变软化型。不同网格尺寸的土工格栅对砂土的强度特性影响不同,土工格栅网格尺寸为3 mm×3 mm时,加筋效果类似硬化的“土工布”;1层土工格栅加筋时,随着土工格栅网格尺寸的减小,对砂土的强度影响不大;2、3层土工格栅加筋时,网格尺寸越小,加筋效果越好;加土工格栅可有效提高砂土的黏聚力,当土工格栅网格尺寸较小时,土工格栅还可提高砂土的内摩擦角。

关键词:土工格栅加筋;网格尺寸;强度特性;破坏形态;三轴试验

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)01-0083-08

Triaxial test study of geogrid reinforced sand

WU Liming¹, ZHU Yalin^{1,2}, XU Qian¹, CHEN Qing^{1,2}, WANG Yixian^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to explore the reinforcement mechanism of geogrids, three geogrids of different mesh sizes were designed. The strain-controlled triaxial instrument was used to carry out the unconsolidated undrained triaxial shear test of reinforced sand. The effects of mesh size of geogrid, number of reinforced layers and confining pressure on the strength characteristics of the sand were investigated. The test results show that when there is no reinforcement, the sand is mainly manifested as the bulging failure of the middle and upper parts. With the increase of the number of reinforced layers, the destructive forms of the sand are successively transformed into the middle bulging failure and shear failure. The partial stress-axial strain curve of plain sand and reinforced sand is characterized by strain softening. Geogrids of different mesh sizes have different effects on the strength characteristics of the sand, and when the mesh size of geogrid is 3 mm×3 mm, the reinforcement effect is similar to that of hardened geotextiles; when the first layer of geogrid is reinforced, as the mesh size of geogrid decreases, it has little effect on the strength of the sand. When the second and third layers of geogrid are reinforced, the smaller the mesh size, the better the reinforcement effect. Adding a geogrid to the sand can effectively increase the cohesion of the sand, and when the mesh size of geogrid is small, the geogrid can also improve the internal friction angle of the sand.

Key words: geogrid reinforcement; mesh size; strength characteristics; failure morphology; triaxial test

收稿日期:2022-07-08;**修回日期:**2022-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774107)

作者简介:吴黎明(1996—),男,安徽宿州人,合肥工业大学硕士生;

朱亚林(1979—),女,安徽庐江人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:zhuyalin@hfut.edu.cn;

汪亦显(1980—),男,湖北黄冈人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

加筋土技术是土木工程领域应用范围较为广泛的土体加固技术。通过在土体中铺设加筋带或土工格栅或土工织物等加筋材料来减小土体的变形,提高土体的整体强度和稳定性,是一种简单实用的土体增强技术^[1]。

近年来,众多学者对加筋土的研究主要分为以下 2 个方面:① 加筋材料方面。文献[2-3]利用土工布作为加筋材料,研究三轴压缩条件下加筋砂土的强度和变形特性;文献[4]利用三轴试验比较 5 种土工合成材料对砂土的加筋效果;文献[5]研究了在不同加筋情况下土工格栅加筋土的力学特征及加筋效果,发现土工格栅加筋提高了土体的黏聚力;文献[6]研究纤维长度、纤维掺量和围压对聚丙烯纤维三维加筋风沙土强度特性的影响;文献[7]开展不同围压、加筋层数的素土和加筋土的三轴蠕变试验。此外,一些绿色环保材料也被用来作为土体加筋材料,文献[8]研究草根加筋土的强度特性;文献[9]进行不同比例稻壳灰加筋土的强度特性试验。② 加筋形式方面。文献[10-11]通过三轴试验,研究单层立体加筋以及双层立体加筋的强度特性;文献[12]研究水平加筋和竖向加筋对膨胀土试样强度的影响,发现竖向加筋的效果最好;文献[13]研究水平加筋和倾斜加筋对黄土强度特性的影响,发现水平加筋的抗剪强度大于倾斜加筋。

综上所述,关于土工格栅网格尺寸如何影响土体强度的相关研究较少。因此本文通过在砂土中加入不同网格尺寸的土工格栅,开展一系列不固结不排水三轴剪切试验,进一步探究土工格栅的加筋机理,为加筋土工程实践提供理论参考。

1 试验介绍

1.1 试验仪器

试验采用南京宁曦土壤仪器有限公司生产的 TSZ-6A 型应变控制式三轴仪。三轴试验试样尺寸为直径 61.8 mm,高度 125 mm。

1.2 试验材料

试验所用砂土的物理力学性质见表 1 所列,砂土的颗粒级配曲线如图 1 所示。

表 1 砂土的物理力学性质

比重	有效 粒径/ mm	平均 粒径/ mm	限制 粒径/ mm	曲率 系数	不均匀 系数	最大 孔隙比	最小 孔隙比
2.66	0.15	0.35	0.39	1.2	2.6	0.72	0.57

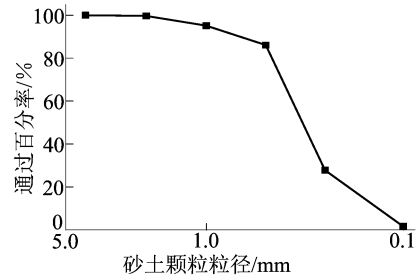


图 1 砂土的颗粒级配曲线

试验设计 3 种不同网格尺寸的土工格栅,土工格栅网格 A、B、C 的尺寸从大到小分别对应为 13 mm×13 mm、8 mm×8 mm、3 mm×3 mm,3 种网格尺寸的土工格栅如图 2 所示。土工格栅技术参数见表 2 所列。

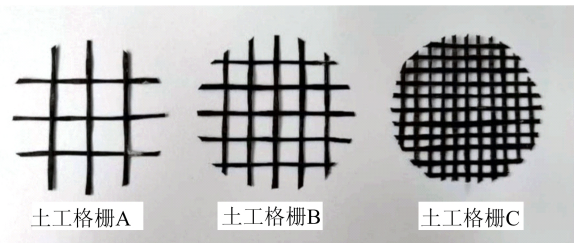


图 2 3 种网格尺寸的土工格栅

表 2 土工格栅技术参数

材料	断裂 伸长率/%	网格尺寸/ mm	抗拉强度/(kN/m)	
			纵向	横向
玻璃纤维 土工格栅	≤4	3×3		
		8×8	12	12
		13×13		

1.3 试样制备和试验方案

试验前按照规范^[14]要求对砂土进行烘干处理,降低水分对试验结果的影响,采用干砂作为填料进行研究。为保证试样密度一致,所有试样均分成 4 层夯实,每层砂土质量相等为 147.5 g,在每层击实至要求的高度后,将表面刨毛,然后装填第 2 层砂土,如此往复,直至完成最后 1 层。土工格栅横肋宽度为 1.5 mm,减小尺寸效应对试验带来的影响。土工格栅需要剪成圆盘状,直径略小于试样直径,防止土工格栅划破橡皮膜。剪切速率为 0.8 mm/min,为更细致观察加筋砂土的破坏形态,当试样剪切到破坏后继续剪切至轴向应变为 15%时,试验结束。根据不同围压 σ_3 、土工格栅网格尺寸及加筋层数,本次试验共 30 种工况,每种工况进行 3 组平行试验,试验工况分类见表 3 所列。不同层数的土工格栅沿试样高度对称位置平行铺设,试样加筋方案如图 3 所示。

表 3 试验工况分类

围压/kPa	土工格栅网格尺寸/mm	加筋层数	最大轴向应变/%
50,100,200	3×3.8×8,13×13	0,1,2,3	15

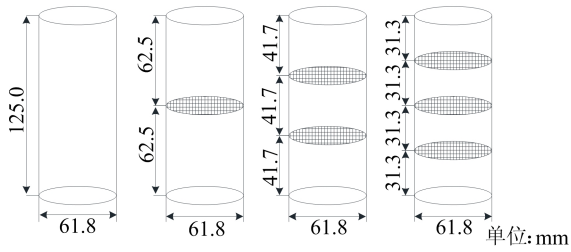


图 3 试样加筋方案

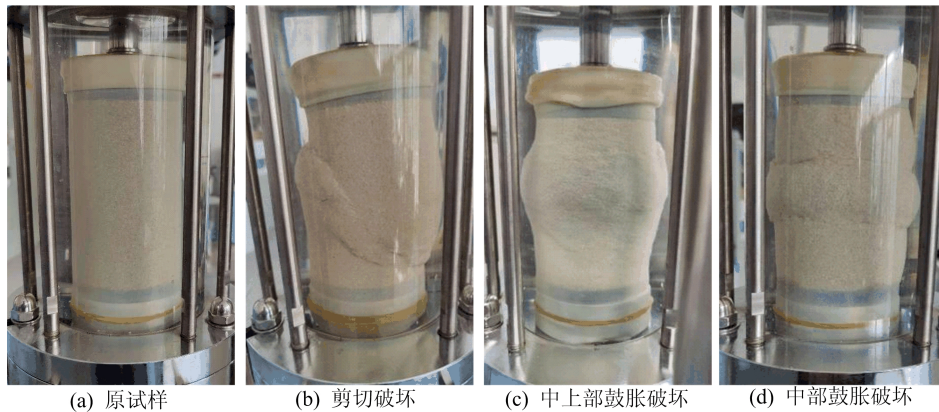


图 4 试样破坏形态

表 4 各工况试样的破坏形态

试样类型	σ_3 /kPa	破坏形态	试样类型	σ_3 /kPa	破坏形态
素砂	50	剪切破坏/中上部鼓胀破坏	1 层土工格栅 A 加筋	50	中上部鼓胀破坏
	100	中上部鼓胀破坏		100	剪切破坏/中上部鼓胀破坏
	200	中上部鼓胀破坏		200	中上部鼓胀破坏
1 层土工格栅 B 加筋	50	中上部鼓胀破坏	1 层土工格栅 C 加筋	50	中上部鼓胀破坏
	100	中上部鼓胀破坏		100	中上部鼓胀破坏
	200	中上部鼓胀破坏		200	剪切破坏/中上部鼓胀破坏
2 层土工格栅 A 加筋	50	剪切破坏/中部鼓胀破坏	2 层土工格栅 B 加筋	50	中部鼓胀破坏
	100	中部鼓胀破坏		100	剪切破坏/中部鼓胀破坏
	200	中部鼓胀破坏		200	剪切破坏
2 层土工格栅 C 加筋	50	中部鼓胀破坏	3 层土工格栅 A 加筋	50	中部鼓胀破坏/剪切破坏
	100	剪切破坏/中部鼓胀破坏		100	剪切破坏
	200	中部鼓胀破坏		200	剪切破坏
3 层土工格栅 B 加筋	50	剪切破坏	3 层土工格栅 C 加筋	50	剪切破坏
	100	剪切破坏		100	剪切破坏
	200	剪切破坏		200	剪切破坏

从表 4 可以看出,试样破坏形态与是否加入土工格栅、土工格栅网格尺寸、围压以及加筋层数等有一定关系。由于在剪切时,土工格栅会发生一定的滑移,且土工格栅结点连接相对较弱,在加载完成后,会出现一定的结点断裂情况。

1) 素砂情况下,砂土试样的破坏形态有中上部鼓胀破坏和剪切破坏 2 种。中上部鼓胀破坏形

2 试验结果分析

通过对比分析试验数据,主要从试样破坏形态、偏应力-轴向应变关系和抗剪强度参数 3 个方面研究土工格栅加筋砂土的加筋机理。

2.1 试样破坏形态分析

根据试验结果对比发现,试样的破坏形态与原试样相比,有剪切破坏、中上部鼓胀破坏和中部鼓胀破坏。试样破坏形态如图 4 所示。

各工况试样的破坏形态见表 4 所列。

成的原因是制样过程中,分层击实导致砂土中的细颗粒沿着孔隙落到试样下部,试样下部密度略大于试样上部密度,出现试样下部强度略大于上部强度的情况,因此素砂试样在剪切过程中就会表现出中上部鼓胀破坏。剪切破坏形成的原因则是由于砂土试样各部分的密度或颗粒结构不是完全相同的,存在一定的差异,试样内部存在“软弱

点”,随着变形不断增加,软弱点的剪应变将会越来越集中,进而造成剪切破坏^[15]。

2) 1层加筋情况下,试样破坏形态大多为中上部鼓胀破坏,偶尔会出现剪切破坏的情况。土工格栅的加入能够在一定程度上限制试样水平方向的变形,但由于加筋间距较大(62.5 mm),土工格栅限制区域有限,并不能弥补试样上部强度较弱的问题,此时格栅附近鼓胀较小,格栅上部鼓胀较大。因此1层加筋试样破坏形态仍然表现为中上部鼓胀破坏。

3) 2层加筋情况下,试样破坏形式有中部鼓胀破坏和剪切破坏。中部鼓胀破坏的形成是由于加筋间距相对较小为41.7 mm,土工格栅能够很好的限制试样水平方向的变形,弥补了试样上部密度小于下部密度的不足,因此试样的破坏形态也由中上部鼓胀破坏转变为中部鼓胀破坏。剪切破坏的形成则是由于砂土试样初始相对密度为0.73,根据等效围压原理,加上土工格栅的加入相当于在土体的侧向增加了1个主应力,土工格栅间接提高了砂土的密实度,密砂的剪切带较松砂反而容易产生^[15]。

4) 3层加筋情况下,试样的破坏形态大多为剪切破坏。这是由于土工格栅网格尺寸较小,阻断砂土的上下移动,土工格栅C类似硬化的“土工布”,剪切时,硬化的“土工布”容易与砂土发生相对滑移。再加上土工格栅带来的小主应力比2层加筋

时更明显,3层加筋会更容易出现剪切破坏。

2.2 应力-应变关系分析

素砂的偏应力-轴向应变关系曲线如图5所示。由图5可知,随着围压的增大,素砂试样的峰值偏应力也随之增大,这表明素砂的强度随围压增大得到明显提高。素砂的应力-应变曲线表现出典型的应变软化特征,即偏应力随着轴向应变的增大而增大,达到峰值后偏应力会逐渐降低进入下降段,这是由于素砂初始相对密度为0.73,其变形特性类似密砂而表现出应变软化^[16]。

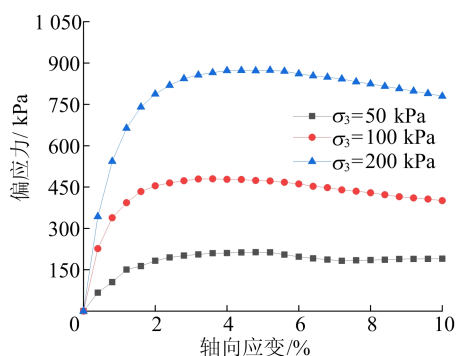


图5 素砂偏应力-轴向应变关系曲线

2.2.1 不同加筋层数下砂土应力应变分析

不同加筋层数下,土工格栅A、B、C对应的加筋砂土偏应力-轴向应变曲线如图6~图8所示。

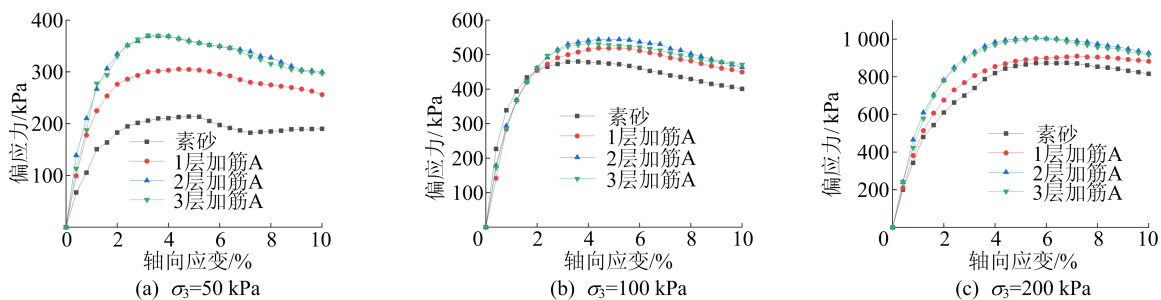


图6 不同加筋层数下土工格栅A加筋砂土偏应力-轴向应变曲线

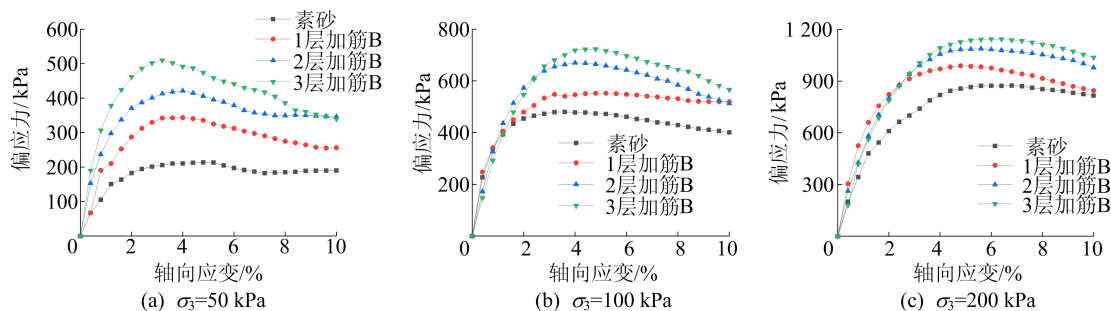


图7 不同加筋层数下土工格栅B加筋砂土偏应力-轴向应变曲线

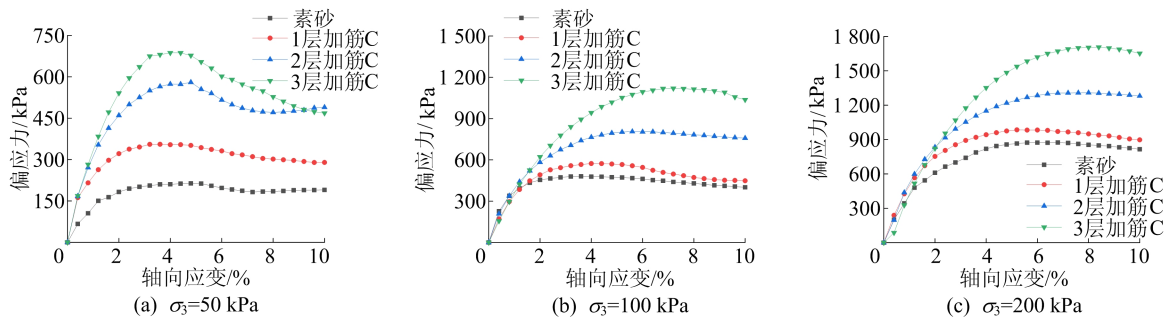


图 8 不同加筋层数下土工格栅 C 加筋砂土偏应力-轴向应变曲线

由图 6~图 8 可以看出:

加筋砂土的峰值偏应力较素砂明显增大,并且随着围压、加筋层数以及土工格栅网格尺寸的减小,峰值偏应力对应的轴向应变越来越大,这表明围压、加筋层数以及土工格栅网格尺寸的减小都可以增大砂土的破坏应变和提高砂土强度。

但由于土工格栅在加载结束后均出现不同程度的断裂情况,以及剪切带形成之后,剪切带附近的土体应力下降,加筋砂土仍然呈现出应变软化特征。

土工格栅 A 加筋时,加筋砂土和素砂之间的峰值偏应力随着围压的增大相差越来越小,加筋作用随着围压的增大变得不再明显。2 层加筋和 3 层加筋的偏应力-轴向应变曲线基本重合,不同围压时 2 层加筋和 3 层加筋的最大偏应力分别相差 1.4、-11.5、-2.6 kPa,两者之间相差很小。

这表明土工格栅 A 加筋时,由于土工格栅网格尺寸较大,与砂土间的相互作用并不能随着加筋层数的提高而变得明显。

土工格栅 B、C 加筋时,加筋砂土的峰值偏应力随着加筋层数的增加不断增大,加筋层数越多砂土强度越高。同时可以看出土工格栅网格尺寸越小,加筋层数对砂土的强度影响越大。在工程应用中,应考虑不同荷载来决定加筋类型和加筋层数。

2.2.2 3 种土工格栅加筋砂土应力-应变分析

1~3 层不同土工格栅加筋砂土的偏应力-轴向应变关系曲线如图 9~图 11 所示。

从图 9~图 11 可以看出,土工格栅网格尺寸越小,峰值偏应力对应的轴向应变越大,说明随着土工格栅网格尺寸的减小,试样的破坏得到了一定程度的抑制。

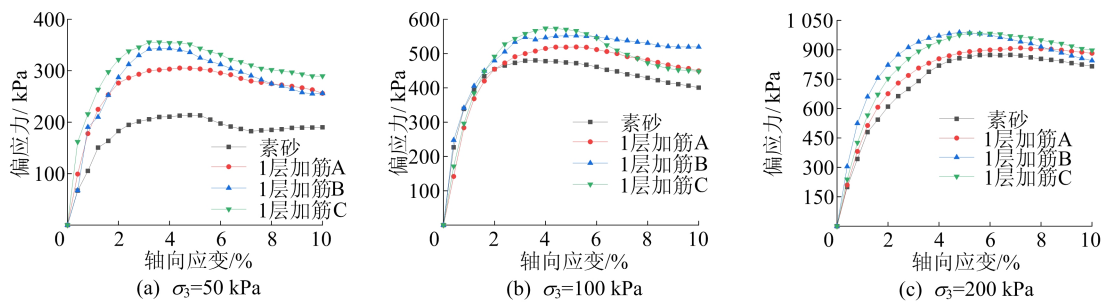


图 9 1 层不同土工格栅加筋砂土偏应力-轴向应变曲线

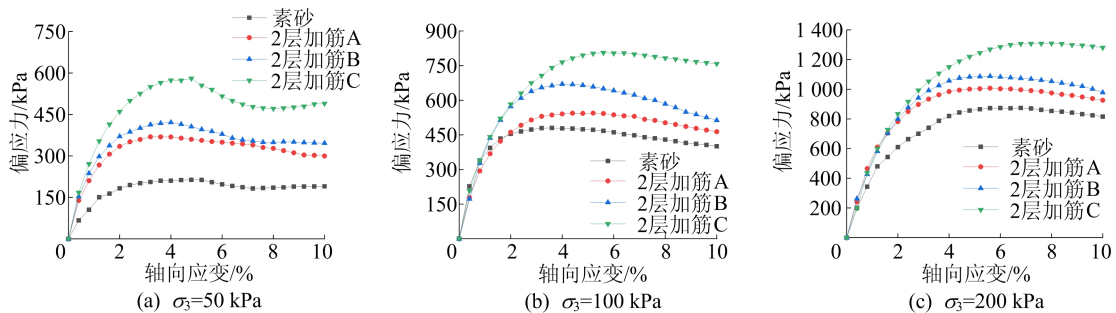


图 10 2 层不同土工格栅加筋砂土偏应力-轴向应变曲线

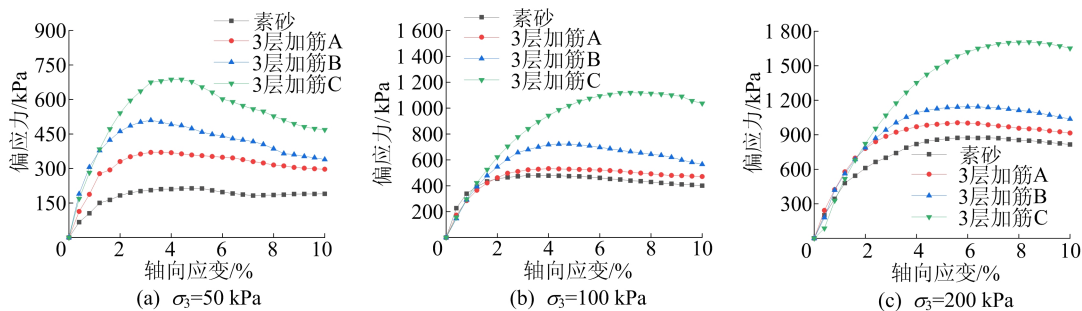


图 11 3层不同土工格栅加筋砂土偏应力-轴向应变曲线

为了更直观地评价 3 种不同网格尺寸土工格栅加筋以及不同层数土工格栅的加筋效果,引入筋材的强度加筋效果系数 R_σ 来评价砂土加筋效果,强度加筋效果系数 R_σ 定义为:

$$R_\sigma = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1' - \sigma_3') \quad (1)$$

其中: $\sigma_1 - \sigma_3$ 为砂土加筋后的破坏偏应力; $\sigma_1' - \sigma_3'$ 为素砂情况下的破坏偏应力。每种工况下的偏应力-轴向应变曲线都存在峰值点,故取峰值偏应力作为其破坏偏应力。不同加筋层数下 R_σ 与 σ_3 的关系如图 12 所示。

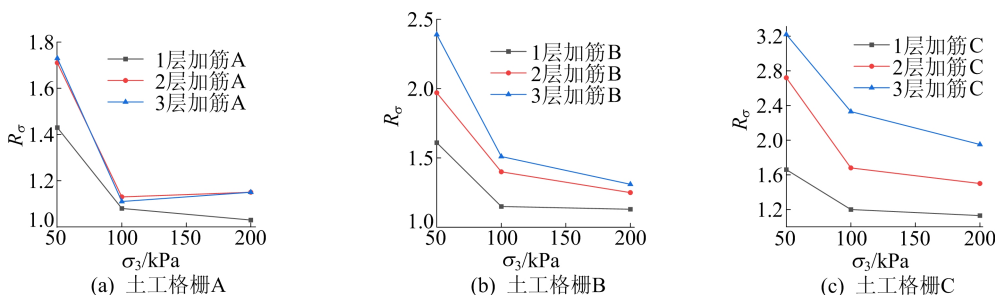


图 12 不同加筋层数下 R_σ 与 σ_3 的关系

由图 12 可知,在不同围压、不同土工格栅、不同加筋层数下砂土的强度加筋效果系数 R_σ 均大于 1.0,说明加筋能够提高砂土强度。从围压、加筋层数、土工格栅网格尺寸变化,可以得出加筋效果系数 R_σ 随着围压 σ_3 的增大而减小。这表明土工格栅在低围压情况下加筋效果比高围压情况下加筋效果更加明显,低围压更能表现出土工格

栅的加筋作用。土工格栅 A 加筋时,2 层加筋与 3 层加筋曲线基本重合,说明网格尺寸过大时,增大加筋层数对砂土抗剪强度提高不明显。土工格栅 B、C 加筋时,可以看出加筋层数越大,加筋效果越好。

不同土工格栅加筋 R_σ 与 σ_3 的关系如图 13 所示。

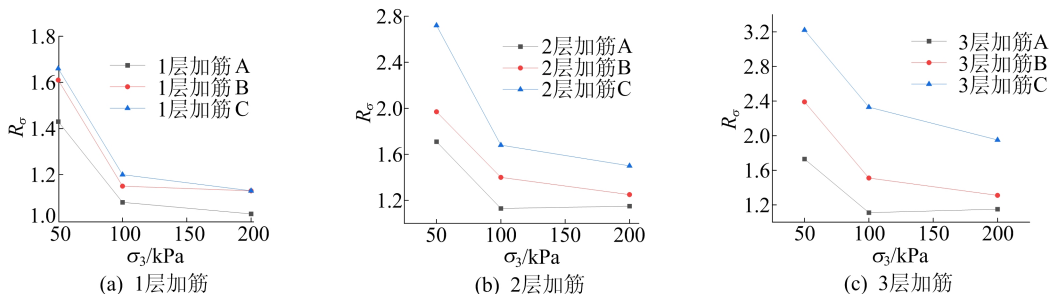


图 13 不同土工格栅加筋 R_σ 与 σ_3 的关系

由图 13 可知,1 层土工格栅 A、B 加筋时,不同围压下 R_σ 值分别相差 0.18、0.07、0.10。1 层土工格栅 B、C 加筋时,不同围压下 R_σ 值分别相

差 0.05、0.05、0。可以看出加筋层数为 1 层时,土工格栅 B、C 加筋的 R_σ 值相差不大。1 层加筋时,随着土工格栅网格尺寸的减小,强度加筋效果

系数似乎存在一个峰值,此时继续减小土工格栅的网格尺寸,对砂土的抗剪强度影响不大。2、3层土工格栅加筋时,加筋效果系数随着网格尺寸的减小而增大。网格尺寸越小,加筋效果越好。

2.2.3 土工格栅加筋砂土的加筋机理分析

土工格栅加筋后,砂土试样的横向变形受到限制。砂土横向变形受到限制,砂土加载时就会越来越密实,加筋相当于提高了砂土在达到相同轴向应变时可承受的偏应力,宏观上表现出应力-应变曲线升高。

土工格栅 A、B 加筋时,参考文献[17]中的“间接影响带”理论,即土中的加筋材料不仅会在土与筋材的接触面上产生直接的作用,而且会对筋材周围一定范围内的土体产生间接的加固作用。“间接影响带”范围随着围压的增大而增大,但是间接影响带相互重合反而会影响砂土的强度,从而导致加筋砂土随着加筋层数的提高,峰值偏应力增大的越来越小。土工格栅 A 结点较少,剪切过程中容易断裂,这可能与 2 层加筋、3 层加筋的加筋效果几乎一致有关。

土工格栅 C 加筋时,由于土工格栅网格尺寸很小,类似一块硬化“土工布”,阻止上下两层的砂土流动,此时峰值偏应力随着加筋层数的提高基本上呈“线性”增加,与文献[18]研究的土工布加筋结果相似。

2.3 强度参数分析

参考文献[19]可以较高精度的利用莫尔圆求出素砂以及加筋砂土的黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 。各种加筋形式下的抗剪强度指标见表 5 所列。

表 5 试样的抗剪强度指标

加筋方式	c/kPa	$\phi/(\text{°})$
素砂	3.70	43.15
1层土工格栅 A 加筋	25.92	41.54
1层土工格栅 B 加筋	27.18	43.08
1层土工格栅 C 加筋	32.95	42.57
2层土工格栅 A 加筋	29.84	43.07
2层土工格栅 B 加筋	45.70	43.45
2层土工格栅 C 加筋	67.79	45.18
3层土工格栅 A 加筋	29.21	43.03
3层土工格栅 B 加筋	65.46	42.74
3层土工格栅 C 加筋	71.15	50.27

由表 5 可以得到素砂和加筋砂土的黏聚力和内摩擦角的变化规律:加筋可以很明显地增大砂土的黏聚力,且随着加筋层数的增加,加筋砂土的黏聚力也随之增大。土工格栅 A 加筋时,2 层加

筋和 3 层加筋的黏聚力相差很小,这由于 2 层加筋和 3 层加筋的最大偏应力基本一样导致的;对比 3 种不同土工格栅 A、B、C 可以看出,土工格栅网格尺寸越小,加筋试样的黏聚力增长幅度越大。

由表 5 可知,土工格栅 A、B 加筋时,土工格栅并不能改变砂土的内摩擦角,素砂与加筋砂土的内摩擦角一直在 43° 左右波动,基本维持不变;土工格栅 C 加筋时,随着加筋层数的增加,加筋砂土的内摩擦角有增大趋势。

围压与偏应力的关系曲线如图 14 所示。由图 14 可知,加筋砂土的偏应力与围压保持良好的线性关系,而且加筋砂土具有准黏聚力,说明加筋砂土仍然符合 Mohr-Coulomb 抗剪强度理论。土工格栅 A、B 加筋不改变砂土的内摩擦角分量,仅增大砂土的黏聚力分量;而土工格栅 C 加筋不仅增加砂土的内摩擦角分量,也增加砂土的黏聚力分量,这与土工格栅加筋的破坏方式有关[4]。土工格栅 A、B 加筋时,筋材肋条在剪切时不断被挤压、变形以及断裂,此时加筋砂土的破坏是由砂土决定的,因此加筋仅增加砂土的黏聚力分量。而土工格栅 C 加筋时,由于网格尺寸过小,类似硬化的“土工布”将砂土试样间隔开,此时加筋砂土的破坏是由土工格栅决定的,因此土工格栅 C 加筋既增加了砂土的内摩擦角分量,也增加了砂土的黏聚力分量,与文献[18]土工布加筋试验结果一致,也验证了上文中土工格栅 C 类似硬化的“土工布”的假设。

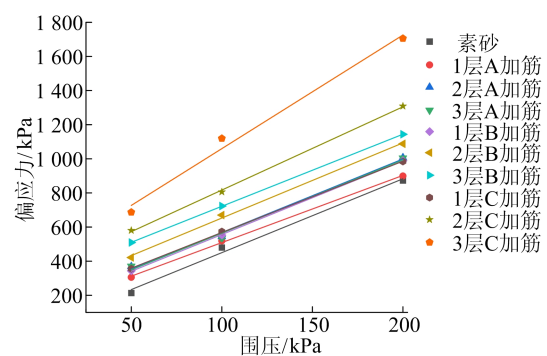


图 14 围压与偏应力的关系曲线

3 结 论

本文开展了 3 种不同网格尺寸土工格栅加筋砂土的不固结不排水三轴剪切试验,研究了不同网格尺寸土工格栅、加筋层数对砂土的破坏形态、偏应力-轴向应变关系和强度特性的影响,得出以

下结论:

1) 素砂和加筋砂土的破坏形态主要有 3 种, 分别是剪切破坏、中上部鼓胀破坏和中部鼓胀破坏, 破坏形态与砂土密度、土工格栅网格尺寸、加筋层数以及围压有关。

2) 素砂和加筋砂土的偏应力-轴向应变曲线表现为应变软化型, 这与砂土的密度以及土工格栅本身的性质有关。加筋可以有效提高砂土强度, 土工格栅 A 加筋时, 提高加筋层数对砂土强度影响不大。土工格栅 B、C 加筋时, 加筋砂土随着加筋层数的增大强度不断增大。土工格栅 C 的加筋效果类似为硬化的“土工布”。

3) 1 层加筋时, 土工格栅 B、C 加筋的 R_0 值相差不大, 随着土工格栅网格尺寸的减小, 对砂土的强度影响不大。2、3 层土工格栅加筋时, R_0 值随着网格尺寸的减小越来越大, 说明加筋效果越来越好。

4) 土工格栅的破坏情况影响砂土的抗剪强度。土工格栅 A、B 加筋时, 加筋可以很明显地提高砂土的黏聚力, 对内摩擦角影响不大。土工格栅 C 加筋时, 加筋既可以提高砂土的黏聚力, 也可以提高砂土的内摩擦角。

[参 考 文 献]

- [1] 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*, 2015, 16(3): 1-15.
- [2] GRAY D H, AL-REFEAI T. Behavior of fabric-versus fiber-reinforced sand[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, 112(8): 804-820.
- [3] 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.
- [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.
- [5] 贺志军, 阿斯嘎, 邹金锋. 加筋含细粒土砂的大型三轴试验分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(10): 2451-2458.
- [6] 赵莹莹, 凌贤长, 张锋, 等. 纤维参数和围压对纤维加筋风沙土力学特性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊 2): 4426-4432.
- [7] 苏立海, 李宁, 朱才辉. 土工布加筋土的三轴蠕变试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(6): 1273-1280.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 张孟喜, 闵兴. 单层立体加筋砂土性状的三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(8): 931-936.
- [11] 张孟喜, 王振武. 双层立体加筋砂土的强度特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增刊 1): 3289-3298.
- [12] 王协群, 郭敏, 胡波. 土工格栅加筋膨胀土的三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(6): 1649-1653.
- [13] 何玉琪, 廖红建, 董琪, 等. 加筋材料改良黄土强度特性的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(增刊 1): 181-185.
- [14] 南京水利科学研究院. 中华人民共和国行业标准: 土工试验规程: SL237—1999 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [15] 蔡正银, 李相蕊. 无黏性土中剪切带的形成过程[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(2): 129-134.
- [16] VERDUGO R, ISHIHARA K. The steady state of sandy soils[J]. *Soils and Foundations*, 1996, 36(2): 81-91.
- [17] 包承纲. 土工合成材料界面特性的研究和试验验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(9): 1735-1744.
- [18] 赵晓龙, 陆晓平, 荣绍洋, 等. 土工布加筋粗颗粒土变形与强度特性试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(6): 165-173.
- [19] 阮波, 张向京, 彭意. Excel 规划求解三轴试验抗剪强度指标[J]. *铁道科学与工程学报*, 2009, 6(5): 57-60.

(责任编辑 张淑艳)