

DOI: 10.11779/CJGE202206009

# 土工格室规格对加筋土剪切性能的影响

左 政<sup>1,2</sup>, 杨广庆<sup>\*1,3</sup>, 王 贺<sup>1,3</sup>, 许淋颖<sup>4</sup>, 靳 静<sup>5</sup>, 梁训美<sup>6</sup>

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学交通运输学院, 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 4. 中交铁道设计研究总院有限公司, 北京 100088; 5. 河北科技大学建筑工程学院, 河北 石家庄 050018; 6. 山东路德新材料股份有限公司, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 土工格室加筋结构由于抗震性好、施工简便、造价低廉, 而广泛应用于公路、铁路等交通基础设施中。目前土工格室加筋结构中仅考虑了土工格室的抗拉强度, 而未考虑土工格室规格的影响, 使土工格室的选用主要依靠工程经验。通过对5种不同规格土工格室开展室内直剪试验, 研究了条带高度、结点间距及法向应力对土工格室-砾砂剪切力学特性的影响, 通过引入加筋强度系数评价了不同法向应力、土工格室规格的加筋效果, 最后分析了土工格室规格对剪切强度参数的影响。试验结果表明: 不同规格土工格室均可有效提高加筋结构的抗剪强度, 其中抗剪强度随条带高度的增大、结点间距的减小而增大, 同时条带高度对剪切强度的贡献约是结点间距的1.8倍。土工格室加筋砾砂的抗剪强度随法向应力增大而增大, 但其加筋强度系数随法向应力的增大而减小。50 kPa作用下, 条带高度对加筋强度系数的增幅在12.57%以上, 而结点间距对加筋强度系数的增幅却不足3.80%。土工格室加筋可显著提高填料的黏聚力, 其中条带高度对黏聚力的提高尤为显著, 增幅约为25%, 而对内摩擦角提高相对较少, 增量最大为5.11°。试验结果可为土工格室在实际工程中的应用和理论研究提供实验基础。

**关键词:** 土工格室; 直剪试验; 剪切力学特性; 加筋强度系数; 条带高度

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)06-1053-08

作者简介: 左政(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事土工合成材料性能与加筋土技术研究。E-mail: geozz@stdu.edu.cn。

## Effects of geocell size on shear behavior of reinforced soil

ZUO Zheng<sup>1,2</sup>, YANG Guang-qing<sup>1,3</sup>, WANG He<sup>1,3</sup>, XU Lin-ying<sup>4</sup>, JIN Jing<sup>5</sup>, LIANG Xun-mei<sup>6</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. CCCC Railway Consultants Group Company Limited, Beijing 100088, China; 5. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 6. Shandong Road New Materials Co., Ltd., Tai'an 271000, China)

**Abstract:** The geocell-reinforced structures (GRS) are widely adopted in transportation infrastructure such as highways and railways due to their good seismic performance, simple construction and low cost. At present, in GRS study, only the tensile strength of geocells is considered, the effects of geocell size of geometry are not considered, so the selection of geocells mainly depends on engineering experience. The effects of geocell strip height, junction spacing and normal stress on the shear mechanical characteristics of geocell-reinforced gravel sand are studied by conducting a series of laboratory direct shear tests on five types of geocells. The reinforcement effects of different normal stresses and geocell sizes are evaluated by introducing the reinforced strength coefficient. Finally, the influences of geocell size on shear strength parameters are analyzed. It is determined that the geocell with different sizes can effectively improve the shear strength of reinforced structures, and the shear strength increases with the increase of strip height and the decrease of junction spacing. Meanwhile, the contribution of the strip height to the shear strength is about 1.8 times that of the junction spacing. The shear strength of geocell reinforced gravel sand increases with the increase of normal stress, but its reinforced strength coefficient decreases with the increase of normal stress. Under 50 kPa, the increase of strip height to the reinforced strength coefficient is more than 12.57%, while the increase of junction spacing to the reinforced strength coefficient is less than 3.80%. The geocell reinforcement can significantly

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079078); 河北省自然科学基金项目(E2018210097, E2019208159)

收稿日期: 2021-06-22

\*通信作者 (E-mail: yangqq@stdu.edu.cn)

improve the cohesion of infill materials, especially the strip height, with an increase of about 25%, the increase of internal friction angle is relatively small, and the maximum increment is  $5.11^\circ$ . The test results can provide an experimental basis for the application of geocells in practical engineering and theoretical researches.

**Key words:** geocell; direct shear test; shear mechanical behavior; reinforced strength coefficient; strip height

## 0 引言

近年来,土工合成材料加筋结构由于具有良好的技术性能和显著的经济优势,在公路、铁路等交通基础设施中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。土工格室作为一种新型三维土工合成材料(图1),与传统平面二维加筋材料如土工格栅、土工布相比,三维蜂窝状的结构能够对填料提供更好的侧向约束<sup>[3]</sup>,从而提升结构层的刚度<sup>[4]</sup>,进而提高加筋结构整体的强度和稳定性<sup>[5]</sup>,因此土工格室广泛应用在许多工程建设中<sup>[6]</sup>,但是目前关于土工格室的一些试验和理论研究滞后于工程实践,因此许多专家学者对土工格室开展了一系列研究。

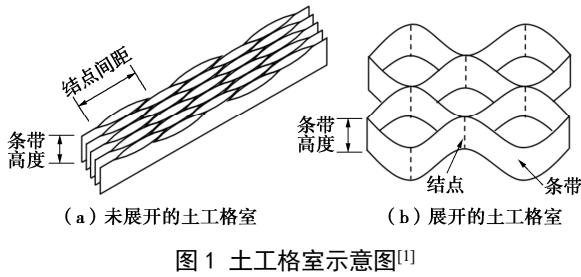


图1 土工格室示意图<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of geocell reinforcement<sup>[1]</sup>

杨广庆等<sup>[1]</sup>通过对土工格室条带进行单轴拉伸试验,研究了试样形状、试样尺寸对土工格室条带强度和变形特性的影响。Liu等<sup>[7]</sup>通过对土工格室条带和结点进行室内试验,探究了土工格室条带的拉伸特性及结点的失效机理。左政等<sup>[8]</sup>通过开展室内试验对比分析了焊接、插接、铆接3种结点连接方式的失效机制。

Song等<sup>[9]</sup>通过数值模拟分析研究了土工格室加筋土挡墙在不同条件下的破坏模式。Nariman等<sup>[10]</sup>提出了一种用极限平衡法研究土工格室加筋边坡稳定性的分析方法。赵明华等<sup>[11]</sup>通过改进传统土柱模型研究了路堤荷载下土工格室加筋体的变形特性。Banerjee等<sup>[12]</sup>对道床荷载的变形行为进行了研究,结果表明土工格室可以显著降低道床的沉降和应力。

上述文献分别对土工格室的拉伸特性及在挡墙、边坡和路堤等工程中的应用进行了广泛研究。然而,目前土工格室加筋结构设计时,仅考虑了土工格室的抗拉强度和伸长率,而未考虑土工格室规格即土工格室条带高度、结点间距对加筋结构安全、经济性能的影响,这使得土工格室在实际工程选用时存在较大的主观性。不同条带高度、结点间距土工格室在加筋结构中抗剪性能的不确定性阻碍了土工格室在公路、铁

路等基础设施中的应用及其经济性能的发挥,因此研究土工格室规格具有重要的工程和经济意义。

既有研究表明土工格室在结构中的主要作用是加固,但在对加筋结构设计及稳定性分析时需要搜索加筋结构最危险的滑裂面,而由于土工格室的存在,将土工格室层上下的填料分为两个区域,使得二者之间的摩擦减弱,进而使其成为结构的危险面,严重影响了结构的安全与稳定,因此亟待需要对界面的力学特性展开研究。直剪、拉拔试验是研究界面力学特性的两种主要方法<sup>[13]</sup>。近年来许多研究人员<sup>[13-15]</sup>主要对土工格栅-土界面的剪切特性进行了研究,但对土工格室-土界面的研究较少。由于土工格室的三维蜂窝结构,目前进行土工格室拉拔试验对设备、材料等要求均较高,因此目前一些学者主要通过室内直剪试验研究了土工格室与土的剪切力学行为。

Tavakoli等<sup>[16]</sup>研究了不同级配、粒径填料对剪切性能的影响,结果表明界面抗剪强度随填料的中等粒径和相对密度的增加而增大。李丽华等<sup>[17]</sup>对比研究了土工格室与土工格栅的剪切性能,结果表明土工格室的加筋效果优于三向土工格栅。刘炜等<sup>[18]</sup>通过直剪试验得出土工格室可以显著提高黏聚力,而内摩擦角提高相对较少。上述文献主要通过直剪试验研究了单一规格土工格室的剪切特性,而对不同规格土工格室对界面抗剪强度的影响、加筋效果的评价以及对剪切强度参数的影响等研究较少。

综上所述,考虑到目前土工格室加筋结构设计忽略了土工格室规格的影响,同时剪切力学参数是加筋结构的重要指标。因此选用5种不同规格土工格室开展室内直剪试验,研究土工格室规格、法向应力对剪切力学特性的影响,定量分析条带高度、结点间距对剪切强度的贡献,并通过引入加筋强度系数评价不同土工格室规格的加筋效果,最后分析土工格室规格对抗剪强度参数的影响。本文的研究有助于提高对加筋结构特性的认识,从而实现更有效、更经济的设计。

## 1 设备和试验设计

### 1.1 直剪试验设备

大型直剪试验设备由石家庄铁道大学自主研制,其主要由直剪试验箱、法向加载系统、水平控制系统和数据记录装置4部分组成,如图2所示。直剪试验

箱由钢制成, 包括反作用杆固定的上试验箱和可移动的下试验箱, 该方式可避免在试验过程中由法向加载系统施加的法向应力产生偏心<sup>[19]</sup>。下试验箱内测尺寸(长×宽×高)为800 mm×400 mm×300 mm, 上试验箱内测尺寸为600 mm×400 mm×300 mm。较大的试验箱尺寸既可减小试样的尺寸效应, 同时可确保试验过程中剪切面积保持不变。此外, 试验箱外侧均匀地布设纵向钢纵肋, 以提升试验箱刚度。法向应力借助倒置的液压千斤顶提供。法向加载系统除可施加恒定的法向应力外, 还可作为压实设备, 用于压实试验箱内的土体, 尤其是下试验箱, 这样可确保土工格室结构层在试验过程中保持平整。水平控制系统用于提供水平作用力, 剪切速率范围为0~30.0 mm/min, 剪切位移最大可达200 mm。最后, 为了加强对试验过程的控制, 试验数据可实时显示在计算机终端上。

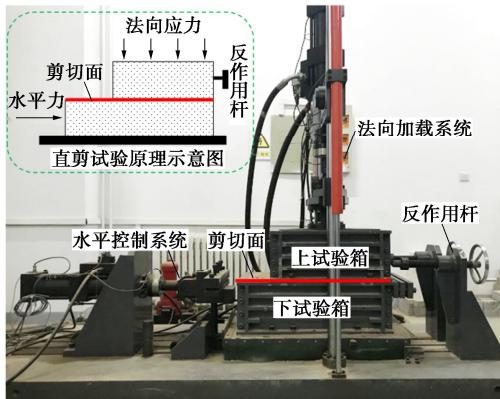


图2 直剪试验设备及原理示意图

Fig. 2 Direct shear test apparatus and schematic diagram of principle

## 1.2 填料

为了解实际工程中土工格室与填料之间的剪切特性, 本研究用填料取自某新建土工格室加筋土挡墙回填料取土场。为获得填料的基本物理指标, 根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)对填料进行了一系列室内试验, 包括颗粒分析试验, 击实试验和直接剪切试验。由筛分法所得颗粒级配曲线如图3所示。

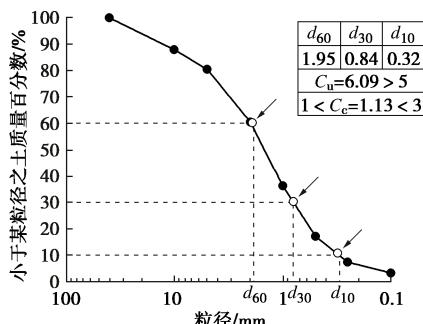


图3 颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves of particles

由图3可知该填料级配良好, 且粒径大于2 mm的颗粒含量占颗粒总量的39.33%, 粒径大于0.075 mm的颗粒含量占颗粒总量的96.7%。对该填料进行粒组划分, 可判定其属于砾砂。由击实试验所得含水率与干密度曲线如图4所示, 可知, 填料最佳含水率为7.8%, 对应最大干密度为2.234 g/cm<sup>3</sup>。由直剪试验得填料的黏聚力和内摩擦角分别为3.1 kPa和30.0°。

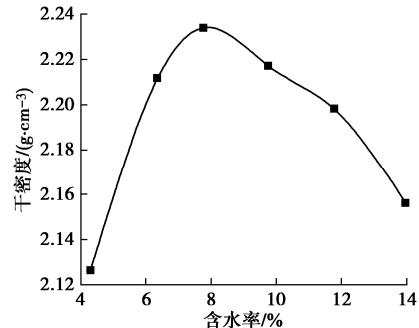


图4 击实试验曲线

Fig. 4 Curve of compaction tests

## 1.3 土工格室

在研究中选用了5种不同规格的土工格室, 其技术参数如表1所示。为简化表示土工格室条带高度与结点间距的尺寸大小, 定义了简化表示方法: “G(条带高度-结点间距)”。

表1 试验用土工格室技术参数

Table 1 Technical parameters of geocells used in tests

条带材质	条带高度H /mm	结点距离S /mm	简化表示方法 /mm
HDPE	100	180	G(100-180)
	100	260	G(100-260)
	100	440	G(100-440)
	150	440	G(150-440)
	200	440	G(200-440)

需要注意的是本研究为减少其他因素对试验结果的影响, 试验选用的土工格室条带材质(high-density polyethylene, HDPE)、厚度(1.3 mm)、抗拉强度(20 kN/m)均相同, 同时结点连接方式均为焊接型。

## 1.4 试验方案

考虑到上、下直剪试验箱之间存在一定接触面积, 且两试验箱质量较大, 因此在开展土工格室剪切试验前, 有必要先对上下两试验箱进行摩擦阻力测试, 即仅对上、下两试验箱施加水平力, 试验箱内无土工格室、无填料, 同时不施加法向荷载来研究两试验箱之间的摩擦阻力情况。然后对本研究选用的5种不同规格的土工格室在4种不同法向应力下进行直剪试验。直剪试验采用应变控制式进行。刘飞禹等<sup>[20]</sup>指出剪切速率对实验结果有显著影响, 因此根据ASTM D5321—14试验规定, 本研究选用1.0 mm/min为剪切速率。直剪试验方案如表2所示, 试验示意图见图5。

表2 本研究用试验方案

Table 2 Experimental programs used in this study

试验名称	试验速率 /(mm·min <sup>-1</sup> )	土工格室规格 /mm	法向应力 /kPa
摩擦阻力		—	—
直接剪切	1.0	G(100 - 180)	
		G(100 - 260)	
		G(100 - 440)	50, 100, 150,
		G(150 - 440)	200
		G(200 - 440)	

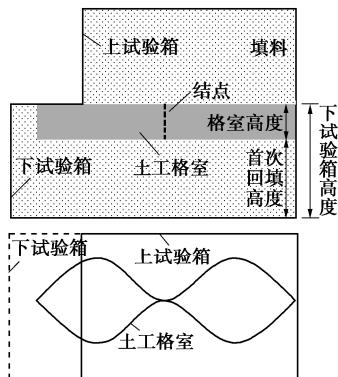


图5 土工格室加筋砾砂直剪试验示意图

Fig. 5 Schematic representation of direct shear tests on geocell-reinforced gravel sand

考虑到土工格室为三维立体加筋材料，较二维平面加筋材料复杂，因此本研究试验时填料分两步进行回填，如图5所示，确保铺设完成后土工格室的上表面与下试验箱表面保持齐平。第一次回填时需先根据下试验箱高度减去试验用土工格室的高度确定填料的首次回填高度，然后根据击实试验达到的最大干密度按照质量控制方法分3层进行回填，压实度按90%控制。接下来铺设土工格室，Hegde等<sup>[21]</sup>研究得出圆形开口的土工格室具有最佳的加筋效果，因此在研究中不同规格的土工格室按照圆形开口进行撑开。然后对土工格室加筋层进行第二次回填，回填后的土工格室试样如图6所示。



图6 回填后呈圆形开口的土工格室

Fig. 6 Geocell pocket shape of circle after backfilling

对G(100-180)、G(100-260)、G(100-440)3种结点间距和G(100-440)、G(150-440)、G(200-440)3种条带高度的土工格室进行直剪试验，旨在分别研究结点间距、条带高度对土工格室-砾砂剪切力学特性的影响。

## 2 结果和讨论

### 2.1 上、下试验箱间的摩擦及结果修正

上、下试验箱之间剪切阻力与剪切位移关系曲线如图7所示。由图7可知上、下两箱体在直剪试验过程中存在不可忽略的摩擦剪切阻力，但范围稳定在1.32~1.46 kN。为了减小上、下试验箱间摩擦对试验结果的影响，确保试验可重复，因此需要对后续土工格室-砾砂界面直剪试验数据进行修正。修正方法为将土工格室-砾砂界面的剪切力减去对应位移处两试验箱之间的剪切阻力，从而使试验结果更加精确。

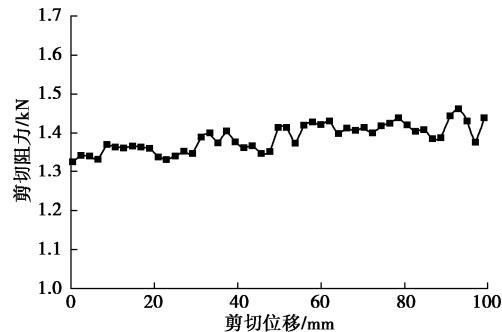


图7 上、下试验箱的剪切阻力与剪切位移关系曲线

Fig. 7 Plot of shear resistance versus shear displacement between upper and lower test boxes

### 2.2 条带高度和结点间距对剪切力学特性的影响

不同规格土工格室在法向应力150 kPa作用下剪切应力与剪切位移关系曲线如图8所示。由图8可知直剪试验初始阶段，不同规格土工格室加筋砾砂的剪切试验曲线几乎重合，分析原因是由于试验起始阶段土体介质首先受力，此时应力尚未传递到土工格室筋材及界面处，即土工格室未开始发挥加筋作用。

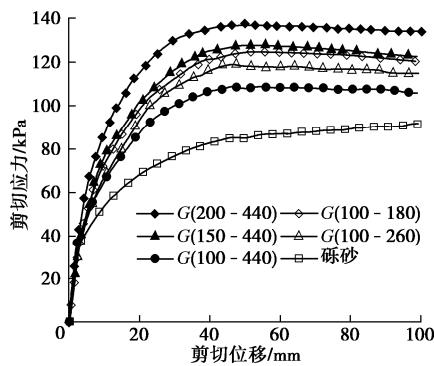


图8 不同规格土工格室加筋砾砂与砾砂的直剪试验曲线

Fig. 8 Plot of direct shear tests on gravel sand and gravel sand reinforced by geocells with different sizes

随着剪切位移的增大，土工格室的加筋效果逐渐体现。这是由于土工格室和砾砂在模量和强度上存在较大差异即二者在荷载作用下会产生不协调的变形，

具体表现为法向应力作用下填料会沿着土工格室条带侧壁产生竖向的相对位移, 从而在土工格室条带侧壁处产生竖直方向的摩擦力。同时, 当试验箱内颗粒孔隙无法进一步压缩时, 填料会产生侧向膨胀, 使土工格室的受力状态由受压转为受拉, 从而使土工格室发挥其对填料的环向约束。此外, 土工格室不仅会对填充于内部的砾砂提供直接约束, 而且还会对土工格室周围一定范围的砾砂起到间接约束的作用, 因此在土工格室-砾砂界面处还存在水平向的摩擦力。基于上述分析可知, 直剪试验过程中土工格室加筋砾砂发挥的加筋作用主要由水平摩擦力, 竖向摩擦力及环向约束力3部分组成, 如图9所示。

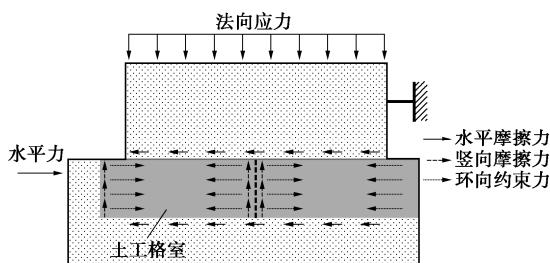


图9 直剪过程中土工格室发挥的加筋作用

Fig. 9 Reinforcement effects of geocell in direct shear tests

由图8还可知, 在同一法向应力(150 kPa)条件下: ①不同规格土工格室加筋砾砂的抗剪强度均明显大于砾砂的抗剪强度, 这表明不同规格土工格室均可显著提高砾砂的抗剪强度。②土工格室结点间距相同( $S=440\text{ mm}$ ), 条带高度由100 mm增加至150, 200 mm时, 界面抗剪强度由108.92 kPa增至125.84, 137.32 kPa, 增量(增幅)分别为16.92(15.53%), 11.48 kPa(9.12%)。可知土工格室加筋土的抗剪强度随土工格室条带高度的增加而增大, 但其增量(增幅)并未呈增大趋势, 说明抗剪强度增量(增幅)与条带高度的增加未呈直接线性关系。③在土工格室条带高度相同( $H=100\text{ mm}$ ), 结点间距由440 mm降低至260, 180 mm时, 界面抗剪强度由108.92 kPa增至117.95, 125.16 kPa, 增量(增幅)分别为9.03(8.29%), 6.21 kPa(6.11%)。土工格室加筋砾砂的剪切强度随结点间距的减小而增大。④通过对比条带高度、结点间距对界面抗剪强度的增量可知, 本研究中土工格室条带高度对界面抗剪强度的贡献较结点间距更为显著。在本文试验所用土工格室中条带高度的增加对剪切强度的增量约是结点间距的减小的1.8倍。

分析原因是因为土工格室加筋砾砂在直剪过程中抗剪强度主要由直接约束和间接约束构成, 其中以直接约束为主, 间接约束为辅。直接约束是土工格室通过环向约束、竖向摩擦等来约束土体的一种约束,

而环向约束及竖向摩擦与土工格室条带的高度密切相关。土工格室条带高度越高则可对更多的土体提供侧向约束, 进而抗剪强度越大。此外, 间接约束是土工格室对其周围一定范围的土体产生的一种约束, 与条带高度和结点间距均有关, 但结点间距的减小主要针对于局部土工格室单元抗剪强度的提升, 而对于加筋结构层的加筋范围影响不大。但条带高度的增加却会使加筋层范围增大, 进而使土工格室加筋层整体的强度得到提高, 因此可知土工格室的高度对于提高土工格室加筋砾砂的抗剪强度起到了非常重要的作用。

### 2.3 法向应力对剪切力学特性的影响

土工格室G(100-440)加筋砾砂在4种法向应力的剪切试验曲线如图10所示。由图10可知, 不同法向应力下土工格室-砾砂界面剪切应力与剪切位移关系曲线呈非线性, 这与 Mehrjardi 等<sup>[16]</sup>、刘炜等<sup>[18]</sup>所得结果保持一致, 可大致分为3个阶段: ①第一阶段为线性增长阶段, 剪切应力随着剪切位移的增加线性增长; ②第二阶段为非线性增长阶段, 剪切应力随着剪切位移的增加迅速增加, 直至剪切应力达到峰值; ③第三阶段为稳定阶段, 剪切应力随着剪切位移的增加而呈现缓慢减低或平稳的趋势。

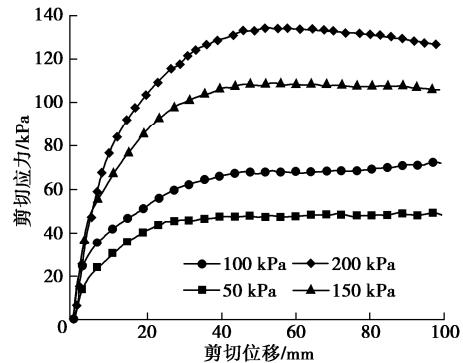


图10 4种法向应力下G(100-440)加筋砾砂的剪切试验曲线

Fig. 10 Plot of shear tests on geocell (100-440)-reinforced

gravel sand under four normal stresses

由图10还可知, 土工格室加筋砾砂的抗剪强度随法向应力的增大而增大, 同时土工格室加筋砾砂出现应变软化。分析原因是法向应力越大, 填料与土工格室之间会相互挤密, 在剪切力的作用下, 填料会沿着土工格室条带边界发生相对位移来抵抗剪切力, 因此不会出现较为平整的剪切面, 而是在剪切面处土工格室条带发生扭曲变形, 如图11所示, 这在一定程度上减小界面的抗剪强度。

同时试验结束后界面处土工格室的开口形状由圆形(图6)变为椭圆形, 根据 Hegde<sup>[6]</sup>、Tavakoli 等<sup>[16]</sup>所得结果土工格室开口形状的改变会减弱其对土体的侧向约束, 因此在较高法向应力下界面抗剪强度会出

现减弱的趋势。由 2.2 节可知不同规格土工格室加筋砾砂的剪应力在不同法向应力下均高于砾砂的剪应力。为了更好地对比不同规格土工格室在不同法向应力下加筋后的抗剪强度变化以反映加筋效果, 引入加筋强度系数  $C_r$ ,

$$C_r = \frac{\tau_{g-s}}{\tau_s} , \quad (1)$$

式中,  $C_r$  为加筋强度系数,  $\tau_s$  为未加筋的土体剪切强度,  $\tau_{g-s}$  为加筋后加筋土的剪切强度。

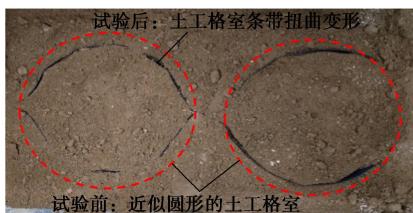


图 11 直剪试验后土工格室开口和条带形状

Fig. 11 Pocket and strip shape of geocell after direct shear tests

通过式(1)可计算出不同规格土工格室试样的加筋强度系数, 如图 12 所示。

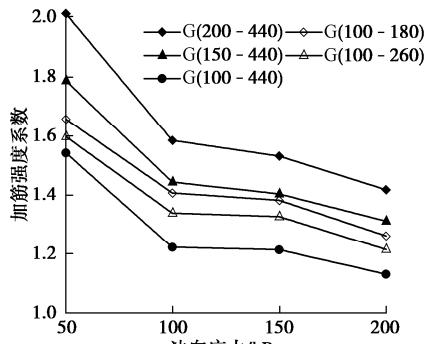


图 12 不同规格土工格室的加筋强度系数

Fig. 12 Reinforced strength coefficient of geocells with different sizes

由图 12 可知: ①不同规格土工格室加筋砾砂在不同法向应力下的加筋强度系数均大于 1.0, 其中 50 kPa 作用下 G(200-440) 的加筋强度系数高达 2.01, 表现出土工格室在改善土体强度方面的积极效果。②在相同法向应力条件下加筋强度系数随条带高度的增加、结点距离的减小而增加, 其中条带高度对加筋强度系数的提高较结点间距显著。如 50 kPa 作用下, 结点间距相同 ( $S=440$  mm), 条带高度由 100 mm 增加至 150, 200 mm 时, 加筋强度系数分别提高 15.58%, 12.57%。土工格室条带高度相同 ( $H=100$  mm), 结点间距由 440 mm 降低至 260, 180 mm 时, 加筋强度系数分别仅提高 3.63%, 3.74%, 以上数据对比证明了土工格室条带高度对提高加筋结构中加筋强度系数的关键作用。③不同规格土工格室加筋砾砂的加筋强度系数均随法向应力的增大而减小, 说明土工格室加筋在低法向应力下加筋效果较好, 反而高法向应力下加

筋效果会降低。分析原因是因为在低法向应力下, 砾砂抵抗剪切破坏的能力较低同时砾砂的剪胀势能较大, 此时需要发挥土工格室侧向约束及竖向摩擦等作用来约束土体的变形从而抵抗剪切破坏, 从而表现出较好的加筋效果。而在高法向应力条件下, 砾砂的膨胀变形受到约束, 且砾砂自身即具有一定抵抗剪切破坏的能力, 这就造成土工格室的作用并不能完全发挥, 即较高的法向应力会间接影响土工格室侧向约束作用的发挥。因此在高法向应力条件下, 土工格室的加筋效果不如低法向应力条件下显著, 同时也说明土工格室在较低法向应力条件下更能发挥加筋作用。④法向应力对条带高度的加筋强度系数影响较大, 而对结点间距的影响较小。法向应力由 50 kPa 增至 100 kPa 时, G(200-440) 降幅最大, 为 21.2%; G(150-440) 次之; 而 G(100-260)、G(100-180) 降幅最小, 约为 15%。法向应力由 50 kPa 增至 200 kPa 时, 同样也是 G(200-440) 降幅最大, 为 29.5%; G(150-440) 次之; G(100-260)、G(100-180) 降幅最小, 为 23.8%。

#### 2.4 剪切强度参数分析

对不同规格土工格室加筋砾砂直剪试验结果进行拟合, 如图 13 所示。由图 13 可知不同规格土工格室的剪应力与法向应力呈现良好的线性关系, 拟合相关系数均在 0.99 以上, 拟合效果好。

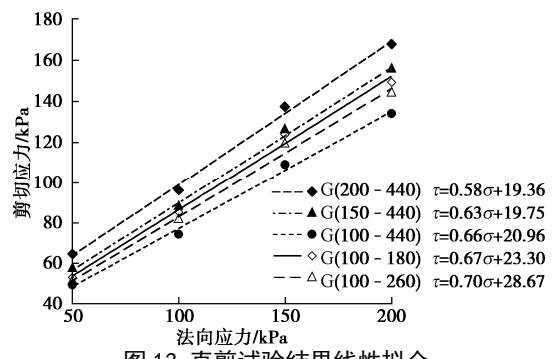


图 13 直剪试验结果线性拟合

Fig. 13 Linear fitting of direct shear test results

砾砂与不同规格土工格室加筋砾砂抗剪强度参数对比如表 3、图 14 所示。由表 3、图 14 可知: ①不同规格土工格室加筋砾砂的抗剪强度参数均大于纯砾砂, 其中对黏聚力影响较为显著, 增长值为 16.26~25.57 kPa, 而对内摩擦角的影响相对较小, 增长值仅为 0.47°~5.11°。②随着条带高度的增加、结点间距的减小, 土工格室-砾砂界面的抗剪强度指标似黏聚力增大, 似内摩擦角增大。其中结点间距相同 ( $S=440$  mm), 条带高度由 100 mm 增至 150, 200 mm 时, 似黏聚力增量分别为 16.26, 20.20, 25.57 kPa, 增幅约为 25%; 似内摩擦角增量分别仅为 0.47°, 3.66°, 5.11°。而土工格室条带高度相同 ( $H=100$

( $S=440$  mm)), 条带高度由 100 mm 增至 150, 200 mm 时, 似黏聚力增量分别为 16.26, 20.20, 25.57 kPa, 增幅约为 25%; 似内摩擦角增量分别仅为 0.47°, 3.66°, 5.11°。而土工格室条带高度相同 ( $H=100$

mm), 结点间距由 440 mm 降至 260, 180 mm 时, 似黏聚力增量分别为 16.26, 16.65, 17.86 kPa, 增幅分别为 2.40%, 7.27%, 似内摩擦角增量分别为 0.47°, 2.31°, 3.28°。

表 3 砂砾与不同规格土工格室加筋砂砾抗剪强度参数对比

Table 3 Comparison of shear strength indexes of gravel sand and gravel sand reinforced by geocells with different sizes

测试材料	(似)黏聚力/kPa	(似)黏聚力增量/kPa	(似)摩擦角/(°)	(似)摩擦角增量/(°)
砾砂	3.10	—	30.0	—
G(100 - 440)	19.36	16.26	30.47	0.47
G(100 - 260)	19.75	16.65	32.31	2.31
G(100 - 180)	20.96	17.86	33.28	3.28
G(150 - 440)	23.30	20.20	33.66	3.66
G(200 - 440)	28.67	25.57	35.11	5.11

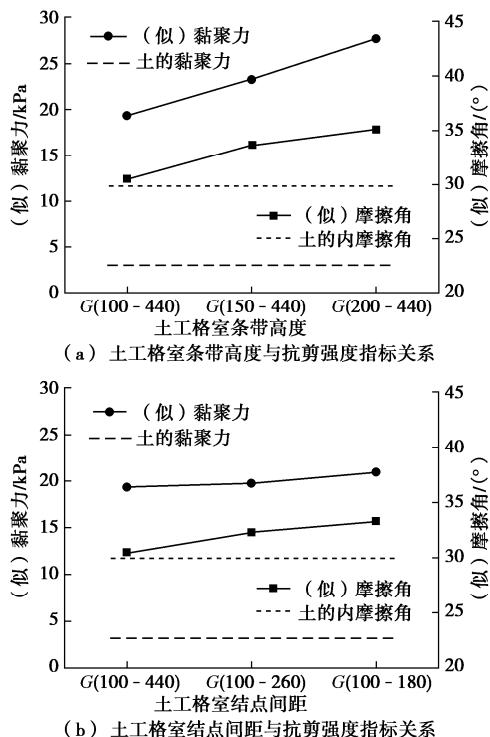


图 14 土工格室规格与抗剪强度指标关系

Fig. 14 Relationship between geocell sizes and shear strength indexes

由此可知条带高度、结点间距均对界面黏聚力影响较大, 而对界面内摩擦角的影响均较小。结点间距相同, 条带高度增加时, 对应的黏聚力平均增量在 4.65 kPa; 条带高度相同, 结点间距减小时, 对应的黏聚力平均增量在 0.8 kPa, 条带高度增大对黏聚力的增量约是结点间距减小的 500%以上, 可知条带高度对界面黏聚力的提高比结点间距更为显著, 同时验证了土工格室条带高度在提高加筋结构剪切强度的重要作用。

### 3 结 论

论文通过开展一系列室内直剪试验, 定性定量研

究了土工格室条带高度、结点间距以及法向应力对剪切力学特性的影响规律及机理, 通过加筋强度系数分析了条带高度及结点间距对加筋土剪切性能的影响。对加筋土剪切力学性能的研究有助于提高土工格室加筋结构的稳定。

(1) 随剪切位移逐渐增大, 土工格室的加筋作用逐渐体现。土工格室的加筋作用主要由水平摩擦力, 坚向摩擦力及环向约束力组成。

(2) 土工格室加筋的抗剪强度随条带高度的增大、结点间距的减小而增大, 此外在本文试验中所用条带高度对界面抗剪强度的贡献约是结点间距 1.8 倍。

(3) 土工格室 - 砂砾的抗剪强度随法向应力增大而增大。剪切过程中条带的扭曲变形及开口形状的改变会减弱对土体的侧向约束。

(4) 不同规格土工格室的加筋强度系数随法向应力的增大而减小, 说明土工格室在较低法向应力下更能发挥加筋作用。在相同法向应力条件下, 加筋强度系数随条带高度增大、结点间距减小而增大, 其中条带高度对加筋强度系数的影响较结点间距显著。

(5) 条带高度、结点间距对似黏聚力影响较大, 增长值范围在 16.26~25.57 kPa, 而对界面内摩擦角的影响较小, 最高增量仅为 5.11°。条带高度增大对黏聚力的增量约是结点间距减小的 500%以上。

因本文主要探究土工格室规格尺寸对加筋土剪切性能的影响, 因此土工格室在直剪试验中放置位置与文献[16~18]保持一致即土工格室的顶面位于剪切面, 未来将进一步开展试验探究土工格室在剪切面不同位置处时对剪切力学特性的影响。

### 参考文献:

- [1] 杨广庆, 左政, 刘英, 等. 土工格室条带拉伸力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 760~767. (YANG Guang-qing, ZUO Zheng, LIU Ying, et al. Experimental investigations on tensile mechanical properties of geocell strips[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 760~767. (in Chinese))
- [2] 曹文昭, 郑俊杰, 严勇. 桩承式变刚度加筋垫层复合地基数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 2): 83~86. (CAO Wen-zhao, ZHENG Jun-jie, YAN Yong. Numerical simulation of composite foundation using pile-supported and geosynthetics-reinforced cushion with variable stiffness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 83~86. (in Chinese))
- [3] 晏长根, 顾良军, 杨晓华, 等. 土工格室加筋黄土的三轴剪切性能[J]. 中国公路学报, 2017, 30(10): 17~24. (YAN Chang-gen, GU Liang-jun, YANG Xiao-hua, et al. Triaxial

- shear property of geocell-reinforced loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, **30**(10): 17 – 24. (in Chinese))
- [4] GARCIA R S, AVESANI NETO J O. Stress-dependent method for calculating the modulus improvement factor in geocell-reinforced soil layers[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, **49**(1): 146 – 158.
- [5] 李丽华, 崔飞龙, 肖衡林, 等. 轮胎与格室加筋路堤性能及承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(1): 81 – 88. (LI Li-hua, CUI Fei-long, XIAO Heng-lin, et al. Performance and bearing capacity of embankments reinforced with waste tires and geocells[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(1): 81 – 88. (in Chinese))
- [6] HEGDE A. Geocell reinforced foundation beds-past findings, present trends and future prospects: a state-of-the-art review[J]. Construction and Building Materials, 2017, **154**: 658 – 674.
- [7] LIU Y, DENG A, JAKSA M. Failure mechanisms of geocell walls and junctions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, **47**(2): 104 – 120.
- [8] 左政, 杨广庆, 刘英, 等. 土工格室不同结点连接方式失效机制试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(9): 1682 – 1690. (ZUO Zheng, YANG Guang-qing, LIU Ying, et al. Experimental investigations on failure mechanism of different junction connections of geocells[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(9): 1682 – 1690. (in Chinese))
- [9] SONG F, LIU H B, MA L Q, et al. Numerical analysis of geocell-reinforced retaining wall failure modes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, **46**(3): 284 – 296.
- [10] KHORSANDIARDEBILI N, GHAZAVI M. Static stability analysis of geocell-reinforced slopes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, **49**(3): 852 – 863.
- [11] 赵明华, 陈大兴, 刘猛, 等. 考虑土拱效应影响的路堤荷载下土工格室加筋体变形分析[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(4): 601 – 609. (ZHAO Ming-hua, CHEN Da-xing, LIU Meng, et al. Deformation analysis of geocell-reinforced body under embankment load considering soil arch effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(4): 601 – 609. (in Chinese))
- [12] BANERJEE L, CHAWLA S, KUMAR DASH S. Application of geocell reinforced coal mine overburden waste as subballast in railway tracks on weak subgrade[J]. Construction and Building Materials, 2020, **265**: 120774.
- [13] 成浩, 王晅, 张家生, 等. 加筋粗粒土筋土界面剪切特性与统计损伤软化模型研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, **15**(11): 2780 – 2787. (CHENG Hao, WANG Xuan, ZHANG Jia-sheng, et al. Shear behavior of geogrid-soil interface and its statistical damage softening model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, **15**(11): 2780 – 2787. (in Chinese))
- [14] 易富, 杜常博, 王政宇, 等. 网孔尺寸对格栅-尾矿界面特性的影响[J]. 煤炭学报, 2020, **45**(5): 1795 – 1802. (YI Fu, DU Chang-bo, WANG Zheng-yu, et al. Effects of mesh size on interface characteristics between geogrid and tailings[J]. Journal of China Coal Society, 2020, **45**(5): 1795 – 1802. (in Chinese))
- [15] LIU F Y, YING M J, YUAN G H, et al. Particle shape effects on the cyclic shear behaviour of the soil-geogrid interface[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, **49**(4): 991 – 1003.
- [16] TAVAKOLI M G, MOTARJEMI F. Interfacial properties of geocell-reinforced granular soils[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, **46**(4): 384 – 395.
- [17] 李丽华, 文贝, 胡智, 等. 建筑垃圾填料与土工合成材料加筋剪切性能研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, **52**(4): 311 – 316. (LI Li-hua, WEN Bei, HU Zhi, et al. Study on reinforced shear behavior of construction waste filler and geosynthetics[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, **52**(4): 311 – 316. (in Chinese))
- [18] 刘炜, 汪益敏, 陈页开, 等. 土工格室加筋土的大尺寸直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(11): 3133 – 3138, 3160. (LIU Wei, WANG Yi-min, CHEN Ye-kai, et al. Research on large size direct shear test for geocell reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(11): 3133 – 3138, 3160. (in Chinese))
- [19] 陈静, 高睿, 刘洋泽鹏, 等. 不同脏污质对格栅加筋道砟性能的影响[J]. 西南交通大学学报, 2021. (CHEN Jing, GAO Rui, LIU Yang-ze-peng, et al. Influence of Various Fouling Materials on Geogrid-reinforced Ballast[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, **57**(1): 200 – 206. (in Chinese))
- [20] 刘飞禹, 朱晨, 王军. 剪切速率和法向加载频率对筋土界面剪切特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(5): 832 – 840. (LIU Fei-yu, ZHU Chen, WANG Jun. Influences of shear rate and loading frequency on shear behavior of geogrid-soil interfaces[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(5): 832 – 840. (in Chinese))
- [21] HEGDE A, SITHARAM T G. Joint strength and wall deformation characteristics of a single-cell geocell subjected to uniaxial compression[J]. International Journal of Geomechanics, 2015, **15**(5): 04014080.