

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.011

土工格栅横肋对加筋砾石强度与变形特性的影响

王志杰^{1,2}, Felix Jacobs², Martin Ziegler²

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 亚琛工业大学 岩土工程研究所, 北莱茵-威斯特法伦州 亚琛 52074)

摘 要: 土工格栅广泛应用于各类加筋土结构工程实践, 在这些实际的加筋土结构中, 加筋土体一般处于平面应变状态。为了更详尽地描述平面应变状态下土工格栅加筋土的复合力学性状, 加深对土工格栅加筋机制的认识, 通过以砾石和具有不同横肋数量的土工格栅为研究对象, 进行大型双轴压缩试验, 探究了平面应变状态下土工格栅横肋对加筋土强度和变形特性的影响。试验结果表明: 土工格栅显著提高了加筋土试样的最大轴向应力, 最大轴向应力随土工格栅横肋数量的增加而增大; 基于数字图像相关 (DIC) 技术, 获得了同一围压下未加筋土和各加筋土试样土颗粒的位移和旋转情况, 直观地展现了土工格栅的加筋效果; 加筋土试样中土工格栅在双轴压缩荷载作用下的纵向拉伸应变分布规律呈现中部最大、朝格栅试样两端递减的规律; 在相同轴向应变条件下, 上层格栅的拉伸应变略大于下层格栅的拉伸应变; 在相同轴向应力作用下, 土工格栅的纵向拉伸应变随横肋数量的增加而减小。

关 键 词: 土工格栅; 横肋; 砾石; 平面应变; 数字图像相关技术

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)08-2234-07

Influence of geogrid transverse members on strength and deformation behavior of reinforced granular soil

WANG Zhi-jie^{1,2}, FELIX JACOBS², MARTIN ZIEGLER²

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, RWTH Aachen University, Aachen, North Rhine-Westphalia 52074, Germany)

Abstract: Geogrid has been widely used in various practical reinforced soil structures, and are more or less in plane strain conditions. In order to describe the compound stress-strain behavior of geogrid reinforced soil under plane strain conditions and to improve the understanding of geogrid reinforcement mechanisms, large-scale biaxial compression tests were carried out on granular soil and geogrids with different numbers of transverse members. The influence of geogrid transverse members on the strength and deformation behavior of reinforced soil was investigated. The experimental results showed that the maximum vertical stresses of reinforced soil specimens were greatly improved using geogrid reinforcements. With increasing number of geogrid transverse members, the maximum vertical stress of reinforced soil specimen increased. Using the Digital Image Correlation (DIC) method, the displacements and rotations of soil particles in the unreinforced and reinforced specimens under the same confining stress were achieved to visualize the geogrid reinforcing effects. Moreover, the maximum longitudinal geogrid tensile strain in each reinforced specimen under biaxial compression loads occurred in the middle part of the geogrid and decreased gradually from the middle part to the side boundaries of the geogrid. Under the same vertical strain, the tensile strains within the upper geogrids were slightly larger than those within the lower geogrids. The longitudinal tensile strains decreased with increasing number of geogrid transverse members under the same vertical stress.

Keywords: geogrid; transverse member; granular soil; plane strain; digital image correlation (DIC)

1 引 言

土工格栅作为一种重要的土工合成材料, 广泛

应用在各类加筋土结构工程实践中, 如路堤、边坡、挡土墙等^[1-4]。其在提高地基承载力、增加边坡稳定性等方面发挥着日益重要的作用。土工格栅的加筋

收稿日期: 2016-10-08

基金项目: 德国自然科学基金资助项目 (No. ZI 714/10-1); 河北省自然科学基金资助项目 (No. E2017210148)。

This work was supported by the German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG) (ZI 714/10-1) and the Natural Science Foundation of Hebei Province (E2017210148).

第一作者简介: 王志杰, 男, 1985 年生, 博士, 讲师, 主要从事土工合成材料加筋土技术等方面的研究工作。E-mail: zwang@stdu.edu.cn

效果是由土工格栅与其周围土体相互作用而产生的。因此，格栅与土之间的相互作用便成为研究土工格栅加筋机制的关键。

为了深入了解格栅与土之间的相互作用，国内外学者对土工格栅加筋土进行了大量的室内试验与数值模拟研究。Palmeira^[5]以及 Moraci^[6]等基于格栅拉拔试验，探究了试验边界条件、格栅长度、轴向压力等因素对拉拔试验结果的影响。Ezzein^[7]和 Bathurst^[8]等结合透明土与数字图像相关（digital image correlation, DIC）技术，量化了拉拔荷载作用下土工格栅与土之间的荷载传递规律。赵川^[9]以及 Chen^[10]等研究了大型三轴压缩试验条件下土工格栅的加筋效果。基于离散元数值模拟，Konietzky^[11]、Ngo^[12]和 Wang^[13]等分别对三轴压缩、直剪和拉拔试验条件下格栅与土的相互作用进行了可视化研究，加深了对筋-土相互作用的认识。

然而，在实际的加筋土结构中，如路堤、挡土墙等，加筋土体一般处于平面应变状态^[14]。Peng 等^[15]通过室内试验和有限元数值模拟研究了平面应变压缩条件下土工格栅类型与加筋层数等对加筋效果的影响。Ruiken^[16]与 Jacobs^[17]等基于大型双轴压缩试验探究了平面应变条件下土工格栅的加筋层数、轴向加筋间距、格栅的拉伸刚度以及格栅纵、横肋数量等对加筋砂土强度和变形特性的影响。

为了更详尽地描述平面应变状态下土工格栅加筋土的复合力学性状、加深对土工格栅加筋机制的认识，本文以砾石和具有不同横肋数量的土工格栅为研究对象，进行了平面应变状态下大型双轴压缩试验，探究了土工格栅横肋对加筋效果的影响。同时，结合数字 DIC 技术，对试样的变形特征进行分析。

2 试验设备

试验在德国亚琛工业大学岩土工程实验室自主研发的大型双轴压缩试验仪上（见图 1）进行。试样的长、宽、高分别为 810、460、800 mm。为使试样处于平面应变状态，试样前后墙体的位置始终保持固定不变，试样在轴向荷载作用下仅沿侧向发生变形。试样的侧向采用柔性薄膜边界，通过两侧的相机与侧向位移测量系统，可获得加压过程中试样在不同高度处的侧向位移。试样所承受的固结围压通过真空泵施加，试验过程中围压保持不变。轴向压力由液压泵通过刚性板施加在试样的顶部，轴向应力的分布情况可通过布置在刚性板和试样之间的高灵敏度金箔传感器获得。试样的前部墙体为加厚的透明玻璃板，通过在加压过程中采集一系列高分辨率照片，并结合 DIC 技术，可获取试样在加载过程中的变形特征。

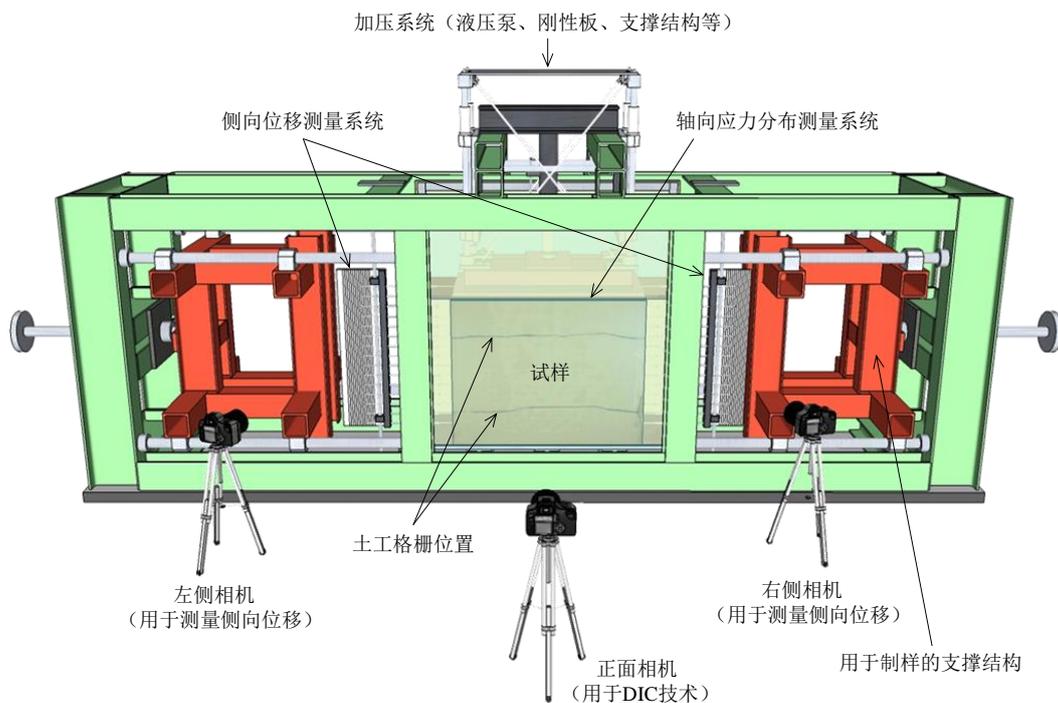


图 1 大型双轴压缩试验仪示意图^[18]

Fig.1 Sketch of the large-scale biaxial compression test apparatus^[18]

3 试验材料与试验方法

3.1 试验材料

本研究的试验材料包括砾石和土工格栅。通过严格的筛分试验,砾石的粒径分布范围为2~8 mm,中值粒径 d_{50} 为4.5 mm。击实试验结果表明,该土料的最大干密度为1.64 g/cm³。在双轴压缩试验中,试样的干密度采用1.60 g/cm³,含水率为0。

试验所采用的土工格栅为德国 NAUE 公司提供的双向焊接聚丙烯(PP)土工格栅,其双向拉伸强度为30 kN/m。格栅的相关尺寸参数如图2所示,其中格栅上黑点表示应变测量位置。为了研究土工格栅横肋对加筋效果的影响,试验采用3种具有不同横肋数量的土工格栅,即S21(具有21根横肋)、S11(具有11根横肋)、S0(无横肋),土工格栅纵

肋的数量均为12根,如图3所示。值得注意的是,S0格栅试样的两端留有非常窄的横肋,以便于试验过程中土工格栅试样的安装。

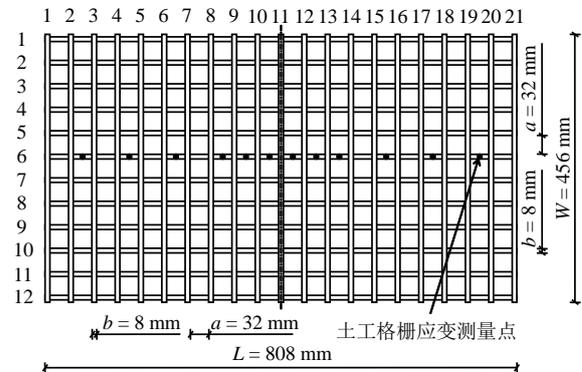


图2 双向土工格栅示意图
Fig.2 Sketch of the biaxial geogrid

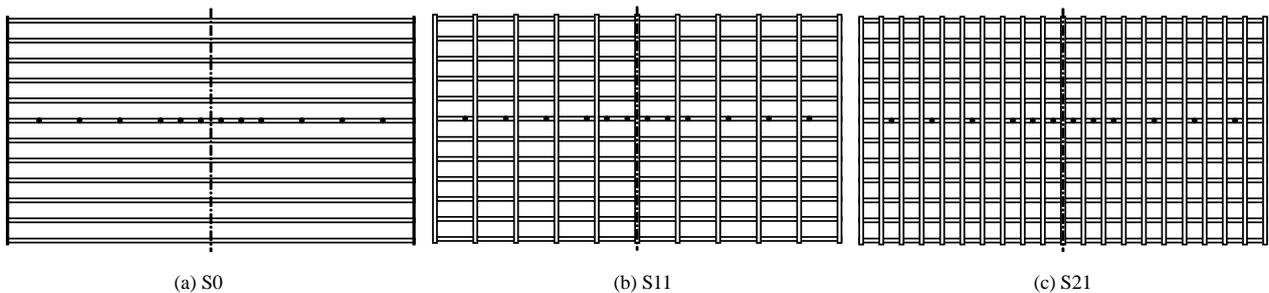


图3 三种具有不同横肋数量的土工格栅
Fig.3 Three types of geogrids with different numbers of transverse members

3.2 试验方法与方案

试样采用分层压实法制成,每层50 mm,共16层。对于加筋土试样,2层土工格栅分别放置于试样的1/4和3/4高度处。为了获得加筋土试样中土工格栅在双轴压缩荷载作用下的纵向拉伸应变分布规律,在每层格栅纵肋上沿中心轴对称设置12个应变测量点,如图3所示。由于格栅试样在双轴压缩荷载作用下会发生一定的弯曲,为了获得合理的应变值,在每个测量点的上下分别安置两个应变片,其平均值即为该测量点处格栅的拉伸应变。

试样制成后,通过真空泵对试样缓慢施加围压。待围压达到预定值后,安装侧向位移测量系统、轴向加压系统,并安放相机。在试验过程中,围压保持不变,轴向加载速率为1 mm/min。左侧和右侧相机的拍摄时间间隔为1 min,正面相机的拍摄时间间隔为30 s。待试样的轴向位移达到80 mm后,试验结束。本研究的试验方案如表1所示。

表1 试验方案
Table 1 Testing program

试验项目	土工格栅类型	围压 σ_3 /kPa
未加筋土试样		2.5、5、10、15、20、25
加筋土试样	S21、S11、S0	2.5

4 试验结果与分析

4.1 应力-应变及体应变关系

鉴于试样尺寸较高($H = 800$ mm)以及试验中所采用的固结围压较低($\sigma_3 = 2.5 \sim 25.0$ kPa),在计算轴向应力时,试样的自重需考虑在内^[16]。同时,由于固结围压通过真空泵施加,在试样顶部边界也认为施加了同样大小的固结应力。因此,本文的轴向应力采用如下公式进行计算:

$$\sigma_1 = \frac{F_v}{A} + \Delta\sigma_1 + \sigma_3 \quad (1)$$

式中: σ_1 为总轴向应力; F_v 为施加在试样顶部的轴向荷载,包括加压板的自重; A 为试样横截面的平

均面积； $\Delta\sigma_1$ 为考虑试样自重的附加轴向应力； σ_3 为固结围压。

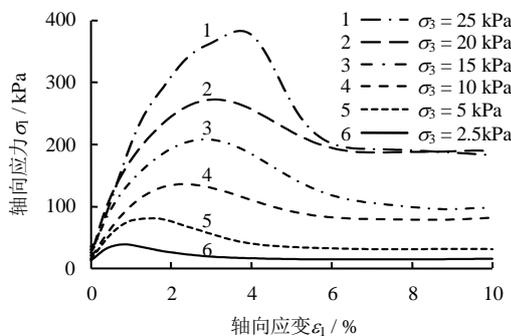
参照文献[16]中的方法，本文中考虑试样自重的附加轴向应力 $\Delta\sigma_1$ 采用如下公式计算：

$$\Delta\sigma_1 = \rho_{\text{soil}} g \frac{H}{2} \quad (2)$$

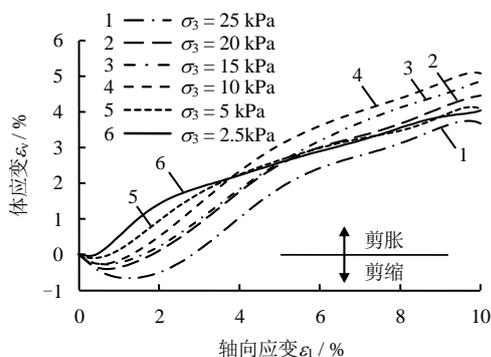
式中： ρ_{soil} 为试样的密度，在本文中 $\rho_{\text{soil}} = 1.60 \text{ g/cm}^3$ ； H 为试样的初始高度，即 $H = 800 \text{ mm}$ 。

由于试样处于平面应变状态，试样的体应变可通过轴向与侧向应变计算。在试验过程中，通过侧向位移测量系统（见图 1）可以获得试样不同高度处的侧向位移，其平均值即为试样的整体侧向位移。

不同围压下未加筋土和不同土工格栅类型加筋土试样的轴向应力-应变关系以及体应变-轴向应变关系曲线分别如图 4、5 所示。全部试样均表现出应变软化特性，如图 4(a)、5(a)所示，这与试样均为密实样相吻合。未加筋土试样的最大轴向应力随固结围压的增大而增大；而加筋土试样的最大轴向应力随土工格栅横肋数量的增加而增大。需要注意的是，考虑到加压板的自重、试样所受到的附加轴向应力以及轴向固结应力等因素，试样在轴向应变为 0 时所承受的轴向应力均大于 0。在小的轴向应



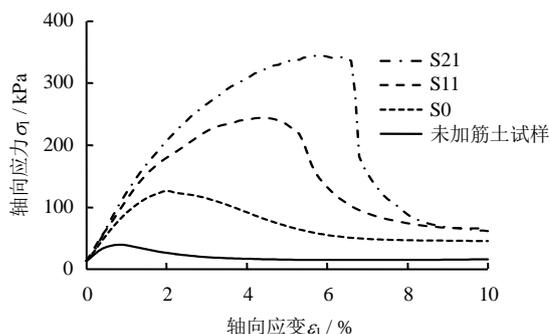
(a) 轴向应力-应变关系曲线



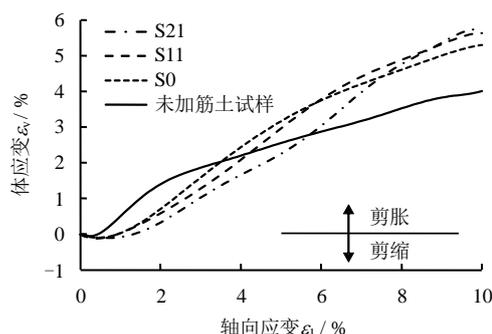
(b) 体应变-轴向应变关系曲线

图 4 不同围压下未加筋土试样的力学关系

Fig.4 Mechanical relations of unreinforced soil specimens under different confining stresses



(a) 轴向应力-应变关系曲线



(b) 体应变-轴向应变关系曲线

图 5 具有不同土工格栅横肋数量加筋土试样的力学关系 ($\sigma_3=2.5 \text{ kPa}$)

Fig.5 Mechanical relations of reinforced soil specimens with different numbers of transverse members ($\sigma_3=2.5 \text{ kPa}$)

变下，未加筋土试样的体应变随固结围压的增大而减小；而加筋土试样的体应变随土工格栅横肋数量的增加而减小，如图 4(b)、5(b)所示。

上述试验结果表明，土工格栅可以有效地限制土体的侧向位移，提高土体的承载力，起到了对土体施加额外固结围压的作用。在本试验中，土工格栅的加筋效果随横肋数量的增加而更加明显。

为了更直观地描述围压和土工格栅对试样峰值应力的影响，在各工况条件下试样的峰值应力与未加筋土试样 ($\sigma_3 = 2.5 \text{ kPa}$) 峰值应力的比值如图 6 所示。在各工况条件下试样的峰值应力也分别标注在图 6 中。未加筋土试样的峰值应力随围压的增大呈现近似线性递增的规律。对于埋置了两层无横肋的土工格栅加筋土试样 (S0) 而言，其峰值应力较同围压下未加筋土试样增加了 2 倍多，该峰值应力的增加仅由格栅纵肋与土体间的摩擦作用而引起。随着土工格栅横肋数量的增加，加筋土试样的峰值应力显著增大。对于埋置了两层具有常规横肋数量的土工格栅加筋土 (S21) 而言，其峰值应力较同围压下未加筋土试样增加了近 8 倍。

4.2 试样变形特征

基于 DIC 技术，未加筋土与加筋土试样在轴向

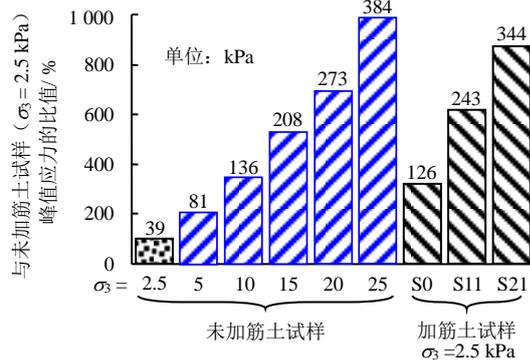


图6 不同工况条件下未加筋土与加筋土试样的峰值应力
Fig.6 Maximum vertical stresses of unreinforced and reinforced soil specimens under different conditions

位移 $\varepsilon_1 = 10\%$ 时颗粒的总位移、颗粒的水平位移以及颗粒的旋转情况如图7所示 ($\sigma_3 = 2.5 \text{ kPa}$)。不同的颜色表征不同的总位移值 (见图7(a))、不同的水平位移方向及位移值 (见图7(b))、不同的颗粒旋转方向及旋转角度 (见图7(c))。在未加筋土试样中, 两条明显的剪切带沿试样顶部中央向试样底部两侧发展, 在剪切带斜上方形成了两个明显的楔形滑动体, 这两个楔形滑动体沿试样的中心轴对称分布。

对于加筋土试样而言, 虽然颗粒的位移与旋转情况也近似沿试样的中心轴对称分布, 但由于土工格栅与土体间的摩擦与阻抗作用, 加筋土试样中颗粒的位移和旋转情况发生了巨大的变化。在 S0 加筋土试样中, 格栅纵肋与土体间的相互摩擦作用, 将施加在试样顶部的轴向荷载部分传递到了格栅纵肋上, 该传递的荷载激活了格栅的拉伸性能、限制了土颗粒的位移与转动。随着格栅横肋数量的增加, 格栅横肋的阻抗作用愈加明显, 进而加强了对土颗粒位移与转动的限制。因此, 在 S21 加筋土试样中, 较大的颗粒位移主要分布在试样顶部和中部的两侧, 其他位置处土颗粒的位移较小, 进而在两层土工格栅之间沿水平方向形成土拱效应。同时, 在该加筋土试样中, 颗粒旋转未形成明显的剪切带。

4.3 土工格栅拉伸应变分布规律

加筋土试样中各土工格栅在双轴压缩荷载作用下的纵向拉伸应变分布规律如图8所示。在本研究中, 格栅的两端均处于自由状态, 故认为格栅两端的拉伸应变值始终为0。土工格栅中部的拉伸应变随试样轴向应变的增大而增大。在试验过程中, 由于数据线与应变片在连接处发生断裂或应变片本身

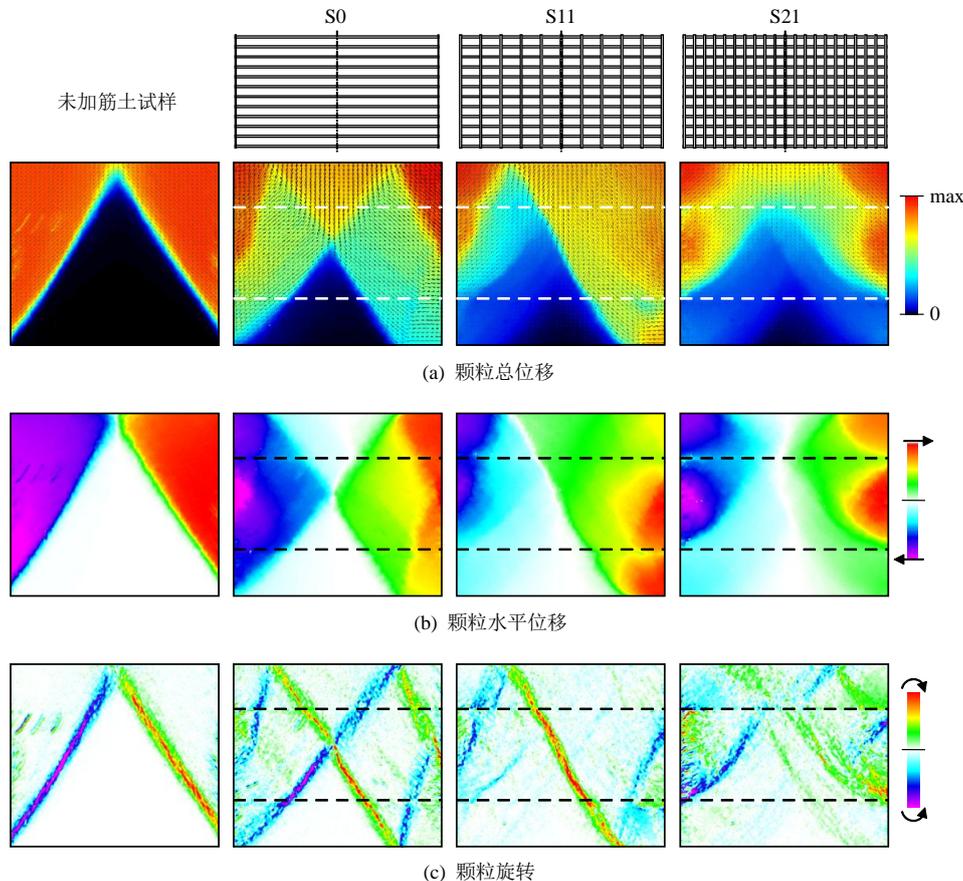


图7 未加筋土与加筋土试样颗粒的位移与旋转情况($\sigma_3 = 2.5 \text{ kPa}$)

Fig.7 Particle displacements and rotations of unreinforced and reinforced soil specimens ($\sigma_3 = 2.5 \text{ kPa}$)

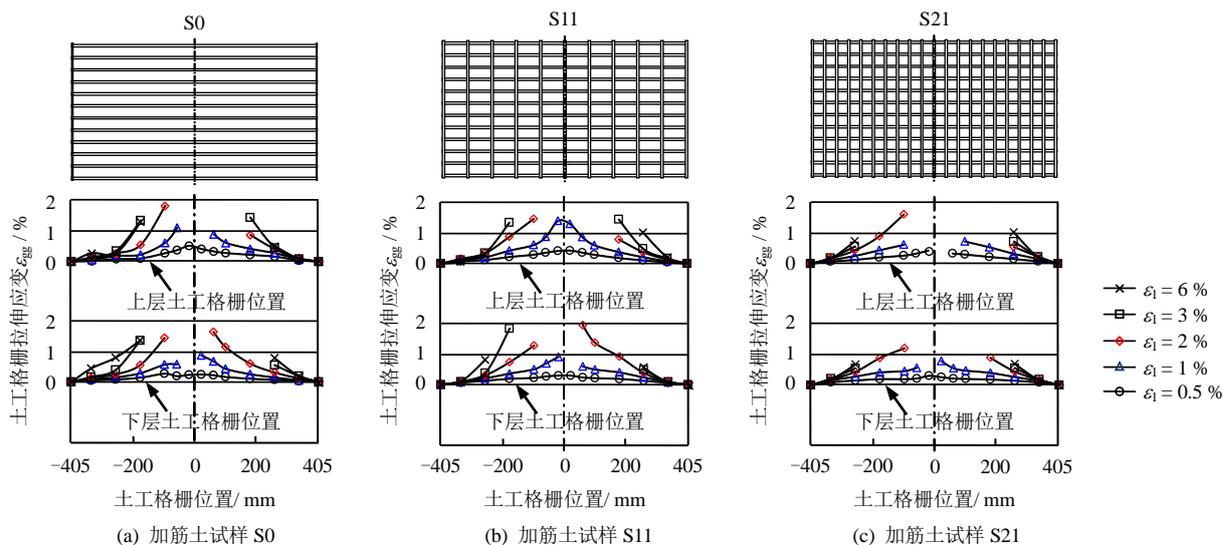


图 8 土工格栅拉伸应变分布规律

Fig.8 Tensile strain distributions along the geogrids

的失效,难以获得格栅试样中部的部分拉伸应变值,该现象在较大的轴向应变情况下更为明显,故本研究中所测量到的土工格栅最大拉伸应变约为 2%。对于每层格栅而言,最大的拉伸应变出现在格栅试样的中部,其值朝格栅试样的两端逐渐减小。在相同轴向应变条件下,上层土工格栅的拉伸应变略大于下层土工格栅的拉伸应变。这是因为,在加筋土试样中,轴向压缩荷载首先经由土体作用在上层土工格栅,由于上层土工格栅与土体的相互作用,消耗了部分由顶部所传递的荷载,进而改变了所传递荷载的大小与方向(如图 7 所示),从而使得上层格栅的拉伸应变略大于下层格栅的拉伸应变。

为研究土工格栅横肋对格栅纵向拉伸应变的影响,本文选取了相同轴向应力($\sigma_1 = 100 \text{ kPa}$)作用下上层土工格栅的拉伸应变进行分析,如图 9 所示。在相同轴向荷载作用下,土工格栅的纵向拉伸应变

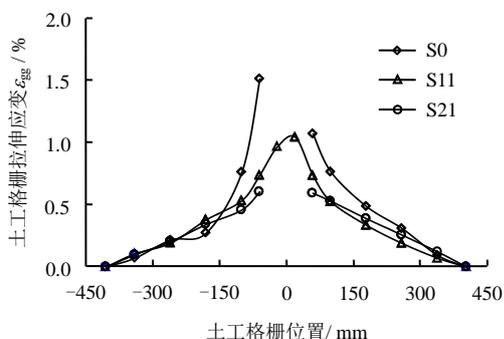


图 9 土工格栅横肋对纵向拉伸应变分布的影响 (上层格栅 $\sigma_1=100 \text{ kPa}$)

Fig.9 Influence of geogrid transverse members on longitudinal tensile strain distributions (upper geogrid $\sigma_1=100 \text{ kPa}$)

随横肋数量的增加呈现出逐渐减小的变化趋势,这一现象在试样的中部更为明显。该研究结果表明,土工格栅横肋与土体间的阻抗作用消耗了部分由土体传递至格栅的水平荷载,进而有效地限制了格栅纵向拉伸应变的增大。同时,随着格栅横肋数量的增加,筋材的纵向拉伸刚度也略有增加,进而使得格栅的纵向拉伸应变逐渐减小。

5 结 论

(1) 土工格栅显著提高了加筋土试样的最大轴向应力,最大轴向应力随土工格栅横肋数量的增加而增大。对于埋置了两层具有常规横肋数量的土工格栅加筋土(S21)而言,其峰值应力较同围压下未加筋土试样增加了近 8 倍。

(2) 基于 DIC 技术,对同一围压下未加筋土与加筋土试样的变形特征进行了可视化研究,获得了各试样土颗粒的位移和旋转情况,直观地展现了土工格栅的加筋效果。该可视化结果表明,土工格栅可以显著降低土体的侧向位移。

(3) 通过在土工格栅试样上安装应变片,获得了加筋土试样中土工格栅在双轴压缩荷载作用下的纵向拉伸应变分布规律,即最大拉伸应变出现在格栅试样的中部,其值朝格栅试样的两端逐渐减小。在相同轴向应变条件下,上层土工格栅的拉伸应变略大于下层土工格栅的拉伸应变;在相同轴向应力作用下,土工格栅的纵向拉伸应变随横肋数量的增加呈现逐渐减小的变化趋势。

参 考 文 献

[1] HAN J, THAKUR J K. Sustainable roadway construction

- using recycled aggregates with geosynthetics[J]. **Sustainable Cities and Society**, 2015, 14: 342–350.
- [2] 介玉新, 秦晓艳, 金鑫, 等. 加筋高边坡的稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 660–666.
JIE Yu-xin, QIN Xiao-yan, JIN Xin, et al. Stability of high reinforced soil slopes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(4): 660–666.
- [3] YANG G Q, LIU H, ZHOU Y T, et al. Post-construction performance of a two-tiered geogrid reinforced soil wall backfilled with soil-rock mixture[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2014, 42(2): 91–97.
- [4] 王贺, 杨广庆, 熊保林, 等. 模块面板式加筋土挡墙结构行为试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 487–498.
WANG He, YANG Guang-qing, XIONG Bao-lin, et al. An experimental study of the structural behavior of reinforced soil retaining wall with concrete-block panel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 487–498.
- [5] PALMEIRA E M, MILLIGAN G W E. Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand[J]. **G éotechnique**, 1989, 39(3): 511–542.
- [6] MORACI N, RECALCATI P. Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2006, 24(4): 220–242.
- [7] EZZEIN F M, BATHURST R J. A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pullout test apparatus and transparent granular soil[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2014, 42(3): 246–255.
- [8] BATHURST R J, EZZEIN F M. Geogrid and soil displacement observations during pullout using a transparent granular soil[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2015, 38(5): 673–685.
- [9] 赵川, 周亦唐. 土工格栅加筋碎石土大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 419–422.
ZHAO Chuan, ZHOU Yi-tang. Experimental study on polymer geogrid reinforced crushed gravel by large-scale triaxial test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(4): 419–422.
- [10] CHEN X, ZHANG J, LI Z. Shear behaviour of a geogrid-reinforced coarse-grained soil based on large-scale triaxial tests[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2014, 42(4): 312–328.
- [11] KONIETZKY H, TE KAMP L, GROEGER T, et al. Use of DEM to model the interlocking effect of geogrids under static and cyclic loading[C]//Proceedings of 2nd International PFC Symposium. London: Taylor & Francis Group, 2004.
- [12] NGO N T, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. DEM simulation of the behaviour of geogrid stabilised ballast fouled with coal[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 55: 224–231.
- [13] WANG Z, JACOBS F, ZIEGLER M. Experimental and DEM investigation of geogrid–soil interaction under pullout loads[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2016, 44(3): 230–246.
- [14] 李广信, 张其光, 黄永男. 等应力比平面应变试验中主应力转换的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1867–1872.
LI Guang-xin, ZHANG Qi-guang, HUANG Yong-nan. Study on transforming of principal stresses in constant stress ratio plane strain tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1867–1872.
- [15] PENG F L, KOTAKE N, TATSUOKA F, et al. Plane strain compression behaviour of geogrid-reinforced sand and its numerical analysis[J]. **Soils and Foundations**, 2000, 40(3): 55–74.
- [16] RUIKEN A, JACOBS F, ZIEGLER M. Large scale biaxial compression testing of geogrid reinforced soil[C]//Proceedings of 5th European Geosynthetics Congress. Valencia: R.B. Servicios Editoriales, 2012.
- [17] JACOBS F, ZIEGLER M, RUIKEN A. Experimental investigation of the stress-strain behaviour of geogrid reinforced soil[C]//Proceedings of 2nd African Regional Conference on Geosynthetics. Accra: IGS, 2013.
- [18] JACOBS F, ZIEGLER M. Investigation of global stress-strain and interaction behavior of geogrid reinforced soil with biaxial compression tests[J]. **Japanese Geotechnical Society Special Publication**, 2015, 2(65): 2209–2214.