

新型三维土工格栅的设计、制备及其加筋性能

贺秋森^a 邵光伟^{a,b} 张鑫^a 黄文龙^a 李志豪^a 张廉登^a 陈南梁^{a,b}

东华大学 a. 纺织学院, b. 产业用纺织品教育部工程研究中心, 上海 201620

摘要: 相比传统二维土工格栅, 三维土工格栅具备更高的承载能力和更优异分散受力特性, 但制备工艺复杂、运输困难、施工不便等问题限制了其发展。基于此, 提出一种由 3D 打印的模块化辅助件和二维土工格栅相结合的新型三维土工格栅, 并利用拉拔试验对新型三维土工格栅的加筋性能进行表征。结果表明, 新型三维土工格栅的抗拉拔能力相较于二维土工格栅明显增强, 且辅助件密度越大, 拉拔力增幅越大。新型三维土工格栅不仅具备可设计性强、制备简单等优点, 而且模块化组装便于快速施工操作。研究为三维土工格栅的设计提供了一种新策略。

关键词: 新型三维土工格栅; 3D 打印; 拉拔试验; 加筋性能; 辅助件密度; 加载压力

中图分类号: TS 156

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)05-0040-07

Design, preparation and reinforcement performance of new 3D geogrids

He Qiusen^a, Shao Guangwei^{a,b}, Zhang Xin^a, Huang Wenlong^a, Li Zhihao^a, Zhang Liandeng^a,
Chen Nanliang^{a,b}

a. College of Textiles, b. Engineering Research Center of Technical Textiles,
Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: Compared with traditional 2D geogrids, 3D geogrids have higher load-bearing capacity and better force dispersion. However, the problems such as complex preparation process, difficult transportation and inconvenient construction have restricted 3D geogrids' development. Based on these, a kind of new 3D geogrids combining 3D-printed modular auxiliary components and 2D geogrids was proposed. The reinforcement performance of new 3D geogrids was characterized by pull-out tests. The results showed that the anti-pull-out capacity of the new 3D geogrids was significantly enhanced compared to that of the 2D geogrids. And the higher the density of the auxiliary components, the higher the increase in the pull-out force. The new 3D geogrids not only have the advantages of strong designability and simple preparation, but also can be modularly assembled, facilitating rapid construction operations. The research provides a new strategy for the design of 3D geogrids.

Keywords: new 3D geogrid; 3D printing; pull-out test; reinforcement performance; auxiliary

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2232024D-09, CUSF-DH-T-2023048, 101-08-0241022); 国家自然科学基金(52303147)

收稿日期: 2025-01-15

作者简介: 贺秋森, 男, 1999 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为三维土工格栅, 18352516618@163.com

通信作者: 陈南梁, 教授, nlch@dhu.edu.cn

component density; load pressure

土工格栅作为一种高性能土工合成材料,能显著提高地基承载能力、增强边坡稳定性、减少差异沉降、限制侧向变形^[1-3],在公路与铁路路基、堤坝、挡土墙等土木工程领域应用广泛^[4-8]。

与传统二维土工格栅相比,三维土工格栅作为一种新型的加筋材料,除了能提供 x 轴和 y 轴方向的加固外,还能提供 z 轴方向的加固,且在提高承载能力和减少表面变形方面表现优异。这引起了越来越多研究者的关注,他们设计出多种类型的三维土工格栅结构。例如:Lawton 等^[9]设计出一种多向加固体结构;Hataf 等^[10]将带有立方体单元的网锚绑扎在二维土工格栅上,设计出一种网锚加筋的三维加筋结构;Zhang 等^[11-12]设计出多种不同形式的三维加筋结构;Dash 等^[13-14]将土工格栅组合叠加,得到了一种复合三维加筋结构;Makkar 等^[15-17]通过对二维土工格栅进行折叠与捆绑,得到了三角形与矩形结构的三维土工格栅。研究者们还分别通过拉拔试验、三轴试验、直剪试验等,验证了三维土工格栅在提高承载力、降低土体沉降、提高剪切强度等方面能发挥更好的作用。

尽管目前三维土工格栅技术已取得一定程度的进展,但仍面临制造工艺复杂、大规模生产难度较大等问题。此外,与二维土工格栅相比,三维土工格栅还因无法卷绕而存在运输不便等问题。因此,开发一种易于制造、施工可行且具备可扩展性的新型三维土工格栅显得尤为重要。

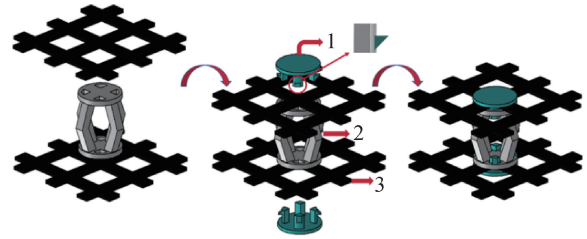
本研究设计了一款新型三维土工格栅,其由模块化的辅助件和二维土工格栅组成。其中,辅助件采用 3D 打印技术制造,此举不仅提高了三维土工格栅设计的灵活性,而且便于实现标准化的批量生产。随后,利用拉拔试验验证了新型三维土工格栅设计的可行性,研究了辅助件密度和加载压力对新型三维土工格栅加筋性能的影响。

1 新型三维土工格栅的设计与制备

1.1 新型三维土工格栅的设计

新型三维土工格栅由固定件、支撑件和二维土工格栅 3 部分组成。其中,每 2 个固定件与 1 个支撑件共同组成 1 个辅助件。支撑件主要在受力时提

供支撑并传递力的功能,是提升新型三维土工格栅加筋性能的关键;固定件基于特定的倾斜倒角设计,通过与支撑件牢固结合,实现二维土工格栅与辅助件的连接,获得统一的整体结构。图 1 示意了新型三维土工格栅的安装过程,即先铺设下层二维土工格栅,随后将支撑件放置于下层二维土工格栅的纵横筋交叉处,接着铺设上层二维土工格栅,最后利用固定件固定,得到三维立体结构。



1—固定件;2—支撑件;3—二维土工格栅。

图 1 新型三维土工格栅安装示意

Fig. 1 Installation diagram of new 3D geogrid

1.2 新型三维土工格栅的制备

本研究使用的二维土工格栅为山东路德新材料股份有限公司生产的经编土工格栅,其原料为玻璃纤维。二维土工格栅几何参数与力学性能见表 1。

表 1 二维土工格栅几何参数与力学性能

Tab. 1 Geometric parameters and mechanical properties of 2D geogrid

| 项目 | 参数 |
|------------------------------------------|--------------|
| 厚度/mm | 1.5 |
| 单位面积质量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) | 504 |
| 孔尺寸/mm | 18(长), 18(宽) |
| 纵/横筋宽度/mm | 8 |
| 孔隙率/% | 48 |
| 轴向拉伸强度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$) | 120 |
| 断裂伸长率/% | ≤ 4 |

3D 打印技术能够适配二维土工格栅的参数变化,快速且可重复地生产辅助件^[18]。本研究首先采用柔性 TPU3D 打印线材作为原料,利用 SolidWorks 软件建立辅助件几何模型(图 2),并基于二维土工格栅几何参数设计辅助件的结构参数(表 2),其中 S_1 表示支撑柱的截面积。其次,将建立的模型导入切片软件 S3D 中进行切片处理,利用 Sermoon D3 打印机进行辅助件的打印。再次,设置打印参数为打

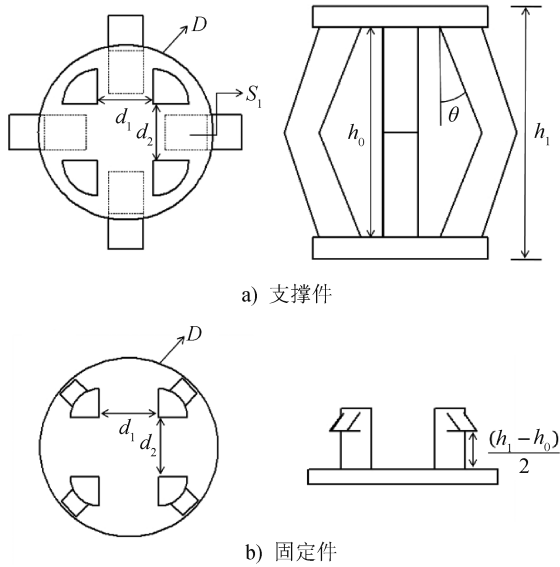


图2 辅助件几何模型

Fig. 2 Geometric model of auxiliary component

表2 辅助件的结构参数

Tab. 2 Structural parameters of auxiliary component

| 项目 | 参数 |
|-------------------|--------------|
| d_1/mm | 8 |
| d_2/mm | 8 |
| D/mm | 25 |
| S_1/mm^2 | 6×6 |
| h_0/mm | 46 |
| h_1/mm | 52 |
| $\theta/(\circ)$ | 30 |

印填充率 100%、层高 0.1 mm、打印温度 215 °C。最后,根据图 1 将打印得到的辅助件与二维土工格栅进行组合安装,得到本研究设计的新型三维土工格栅(图 3)。



图3 新型三维土工格栅实物照片

Fig. 3 Physical photograph of new 3D geogrid

2 新型三维土工格栅的加筋性能

现有试验方法中,拉拔试验被认为是研究土工格栅-土界面行为的最佳方法之一^[19]。众多研究者已对各种类型的土工格栅进行了大量的拉拔试验,为土工格栅的设计、安装和应用提供了有价值的理论支撑^[20-22]。本研究采用拉拔试验探究新型三维土工格栅的加筋性能,研究辅助件密度和加载压力对新型三维土工格栅加筋性能的影响。

2.1 砂土原料

拉拔试验用砂土采用市售河砂。参照统一土壤分类系统 (USCS),该河砂归属 SP 级 (sand poorly graded)。参照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》测得的河砂基本物理力学参数如表 3 所示。其中:砂土粒度分布通过筛分法测得, D_{10} 、 D_{30} 、 D_{60} 分别指砂土体系中粒径累积分布占比达到 10%、30%、60%时所对应的粒度,用直径表示;相对密度采用击实试验测得;砂土的内摩擦角和黏聚力采用直剪试验在 50、100、150 及 200 kPa 的法向压力下测定,以表征剪切强度。

表3 河砂基本物理力学参数

Tab. 3 Basic physical and mechanical parameters of sand

| 项目 | D_{10}/mm | D_{30}/mm | D_{60}/mm | 最大干密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 最小干密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 粒径 不均匀系数 | 曲率系数 | 内摩擦角/ (\circ) | 黏聚力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$) | 相对密度/ % |
|----|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------|------|----------------------|-------------------------------------------|------------|
| 参数 | 0.265 | 0.330 | 0.428 | 1 726 | 1 228 | 1.61 | 0.96 | 39 | 6.98 | 66 |

2.2 试验仪器

图 4 为拉拔试验装置实物照片及其结构示意图。拉拔试验装置主要由带夹持系统的试验箱、常压系统、牵引装置,以及仪表和数据采集系统等 4 部分组成。

试验箱内部尺寸为长 800 mm、宽 400 mm、高

320 mm。试验箱前后两端面由 8 mm 厚的钢板制成,左右两侧面由 20 mm 厚的有机玻璃片制成。测试时,土工格栅固定在前端面的夹具上。夹具与由伺服机构控制的水平作动器相连,旨在以恒定的速率拉动土工格栅。常压系统采用柔性气囊加压,确保砂土表面载荷分布均匀,气囊内压力由气压计实

时监测。拉拔试验参照 ASTM D6706 - 01 标准进行。

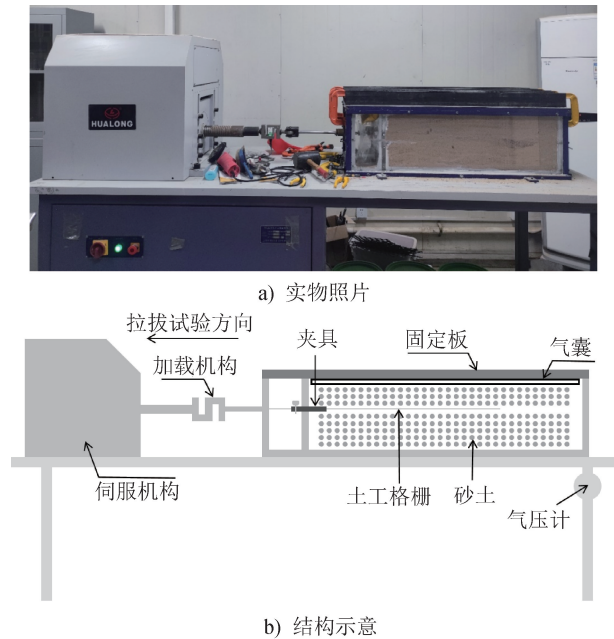


图 4 拉拔试验装置
Fig. 4 Pullout testing apparatus

2.3 拉拔试验方案

拉拔试验过程中,上层土工格栅试样由夹具夹持。为证实三维土工格栅加筋性能的提升与辅助件的加入形成了三维结构有关,二维土工格栅拉拔测试时选择放置 2 层二维土工格栅,试样名称简记为 2DG。且为了保证变量的唯一性,测试过程中土工格栅尺寸保持一致,即上层土工格栅尺寸取 250 mm×450 mm,下层土工格栅尺寸取 250 mm×250 mm,夹具夹持尺寸为 250 mm×200 mm,这样拉拔试验过程中上下层土工格栅与砂土的接触面积均为 250 mm×250 mm。此外,为避免土工格栅从夹具中滑脱,使用环氧树脂将上层土工格栅固定于夹具中。

为探究辅助件密度对新型三维土工格栅横向加筋性能的影响,针对 250 mm×250 mm 的新型三维土工格栅分别设计了 1、2 和 4 个辅助件的配置方案,试样名称分别简记为 3DG-1、3DG-2 和 3DG-4。辅助件放置示意如图 5 所示,其中每个交点表示土工格栅纵筋与横筋的交叉点,红色为辅助件放置位置。

2.4 拉拔试验测试过程

试验箱内部总高度为 320 mm,夹具位置距试验箱底面 145 mm。根据每层压实土层的厚度,向试验箱中倒入砂土,并使用钢锤锤击,均匀压实砂土并确

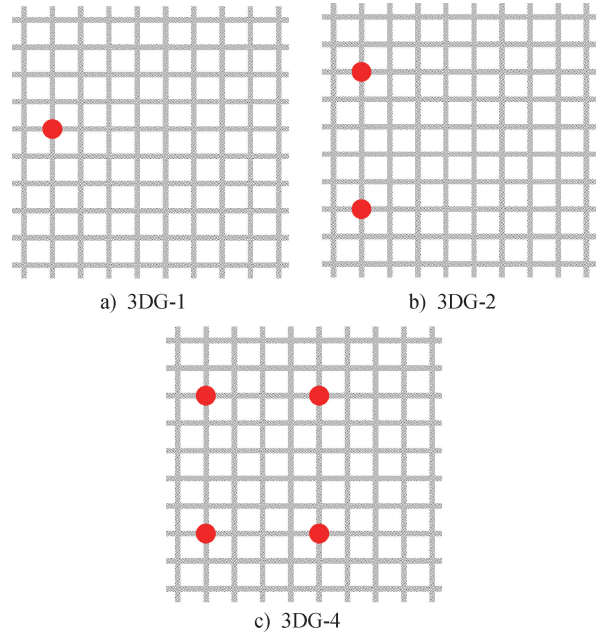


图 5 新型三维土工格栅中辅助件放置示意
Fig. 5 Illustration of placement of auxiliary components in new 3D geogrid

保压实度为 95%。

新型三维土工格栅的拉拔试验准备流程如下:首先,往试验箱中倒入 26 kg 砂土,锤击压实至 50 mm 高度;其次,重复 1 次上述操作,得到总高 100 mm 的砂土;再次,铺设新型三维土工格栅,倒入 23.6 kg 砂土,将砂土与三维土工格栅共同压实到总高度为 145 mm,此时上层土工格栅处于夹具高度;最后,以锤击压实 50 mm 高度的砂土为 1 个周期,重复第 1 个步骤,铺设砂土直至总高度达 320 mm。

二维土工格栅的拉拔试验准备流程与新型三维土工格栅的相似:首先,以锤击压实 50 mm 高度的砂土为 1 个周期,重复 2 个周期得到 100 mm 高度的砂土;其次,铺设尺寸为 250 mm×250 mm 的二维土工格栅,随后倒入 23.6 kg 砂土,锤击压实得到 45 mm 高度的砂土;再次,铺设尺寸为 250 mm×450 mm 的二维土工格栅,该层土工格栅为夹具夹持;最后,继续以锤击压实 50 mm 高度的砂土为 1 个周期,铺设砂土直至总高度达 320 mm。

砂土铺设完成后,在试验箱上方放置柔性气囊并盖上盖板。填充气囊并施压,控制加载压力分别为 10 kPa 与 20 kPa。参照 ASTM D5321 标准,以 1 mm/min 的恒定速率施加水平拉力,最终得到土工格栅的拉拔力-位移曲线。

3 试验结果与分析

图6展示了不同加载压力下,二维土工格栅和不同辅助件密度的新型三维土工格栅的拉拔力-位移曲线。

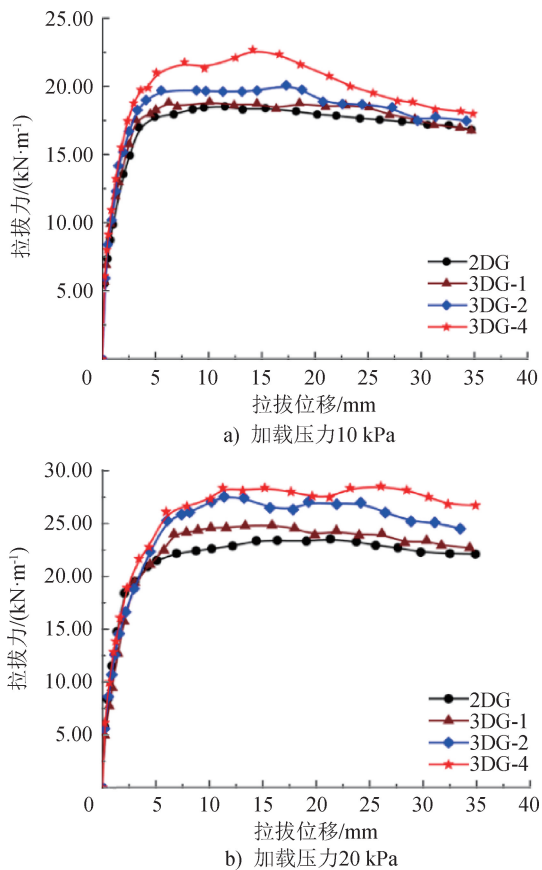


图6 不同土工格栅的拉拔力-位移曲线

Fig. 6 Pull-out force - displacement curves of different geogrids

从图6可以看出:新型三维土工格栅的拉拔力明显高于二维土工格栅。在相同的测试条件下,当加载压力分别为10 kPa与20 kPa时,二维土工格栅的最大拉拔力只有18.54 kN/m和23.54 kN/m,而新型三维土工格栅的最大拉拔力分别达23.42 kN/m和28.52 kN/m。且随着辅助件密度的增大,新型三维土工格栅的最大拉拔力增加。

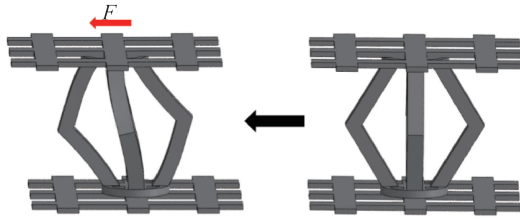
后文从土工格栅加筋机制的角度分析拉拔力的表现。Wilson-Fahmy等^[23]基于砂土与二维土工格栅相互作用机制的研究,提出二维土工格栅的拉拔力由3部分组成,即所有纵筋和横筋的极限摩擦力、承载阻力和土工格栅空隙内摩擦力。对于新型三维土工格栅,除涉及上述二维土工格栅的3种力

之外,辅助件与砂土接触同样会产生相互作用,并产生额外的约束。且辅助件将上下层二维土工格栅连接成一个整体,下层土工格栅也参与了应力的分散,共同承受施加的载荷。此外,拉拔试验过程中,砂土会因剪切作用而膨胀,促使土工格栅周围砂土颗粒产生额外应力,从而增加后续的拔出力^[24]。故相较于二维土工格栅,新型三维土工格栅可调动的砂土颗粒更多,所需的拉拔力更大。

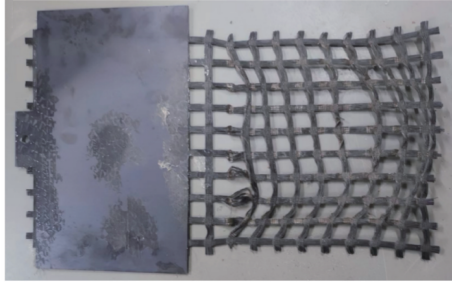
此外,从图6还可以看出:拉拔试验初始阶段,拉拔力快速增大,表明初始阶段抗拉拔能力响应快速。当拉拔位移达5 mm时,二维土工格栅的拉拔力趋于稳定,这与Bergado等^[25]的研究结果一致;而新型三维土工格栅的拉拔力后续会呈现波动变化,甚至出现了下降的情况,这在添加了2个和4个辅助件的新型三维土工格栅拉拔力-位移曲线中表现尤为明显。造成新型三维土工格栅这一表现的主要原因是:初始阶段,新型三维土工格栅在外力作用下发生变形,并在固定辅助件的位置,尤其是在承受大部分拉拔力的上层土工格栅固定辅助件的位置出现应力集中,如图7a)所示;随着拉拔力的不断增大,三维土工格栅的前端会因应力集中而先遭到破坏,辅助件加固作用失效,导致拉拔力呈波动式下降。图7b)以3DG-4为例,展示了新型三维土工格栅上层前端受拉拔的影响更大,这与Hussein等^[26]的研究结果一致。虽然新型三维土工格栅上层中部在初始阶段受力影响较小,但随着拉拔位移的增加以及前端被破坏,中部逐渐成为应力的集中点,最终被破坏。

图8对比了不同加载压力条件下,二维土工格栅和不同辅助件密度的新型三维土工格栅的拉拔力峰值。从图8可以看出,与二维土工格栅相比,在10 kPa和20 kPa的加载压力条件下,添加1个辅助件可使拉拔力分别提高1.8%和5.5%;添加2个辅助件可使拉拔力分别提高8.4%和17.0%;添加4个辅助件可使拉拔力分别提高22.4%和21.2%。由此可见,辅助件对新型三维土工格栅加筋性能的影响不是线性的,这可从以下方面加以解释:

一是辅助件的数量。只添加1个辅助件时,辅助件对于巨大的拉拔力很难产生有效的分散作用,其强化作用较小,且易遭破坏。随着辅助件数量的



a) 三维土工格栅拉拔变形示意



b) 拉拔试验后实物照片

图 7 新型三维土工格栅拉拔试验

Fig. 7 Pull-out test of new 3D geogrid

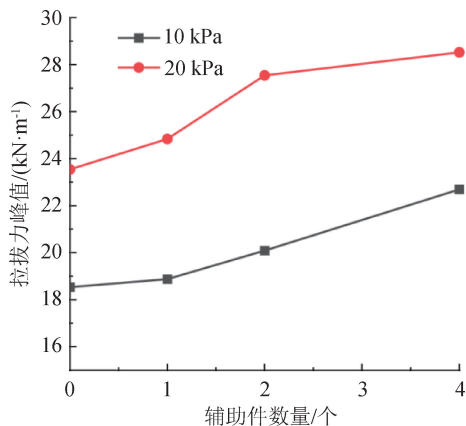


图 8 不同土工格栅拉拔力峰值

Fig. 8 Peak pull-out forces of different geogrids

增加,辅助件之间相互作用,共同分散受力,强化作用增大。

二是辅助件的排列方式。添加 1 个或 2 个辅助件时,它们均位于新型三维土工格栅的前端,而添加 4 个辅助件时,新增的辅助件位于新型三维土工格栅的中部,即使位置与受力点有一定距离,辅助件依然可以分散受力。因此,实际应用时,合理规划辅助件的数量与排列可增强新型三维土工格栅的抗拉拔能力。

三是加载压力的影响。加载压力较小时,砂土松散,若此时辅助件密度较小,则加筋性能提升不显著。辅助件密度不变,加载压力较大时,砂土致密,

新型三维土工格栅表现出更优的加筋性能。

4 结论

本研究提出了一种结合 3D 打印技术制备新型三维土工格栅的方法,辅助件可实现快速与可重复生产。通过对新型三维土工格栅和二维土工格栅进行拉拔试验,研究了辅助件密度和加载压力对新型三维土工格栅加筋性能的影响。研究结果表明:3D 打印技术为新型三维土工格栅的设计与制备提供了很高的设计灵活性和生产便利性。可根据实际应用场景和需求,灵活调整新型三维土工格栅结构参数。与二维土工格栅相比,新型三维土工格栅的抗拉拔能力增强,且辅助件密度越大,拉拔力增幅越大。本研究为提高土工格栅加筋性能提供了一种新思路,后续可对辅助件进行优化设计,并探究更佳的加筋性能表征方法。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 杜炜, 聂如松, 谭永长, 等. 格栅节点加强对风积沙筋土界面力学性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(1): 172-187.
- [2] 丁选明, 任寄瑜, 欧强, 等. 倾斜地层土工加筋路堤列车荷载动力响应特性模型试验研究[J/OL]. 土与环境工程学报(中英文), 1-12 [2025-01-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20241215.0833.002.html>.
- [3] 梁洁, 邵慧奇, 季小强, 等. 导水加筋土工织物的力学和芯吸性能分析[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(6): 9-16.
- [4] EL SAWWAF M A. Behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay slope[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25(1): 50-60.
- [5] BROWN S F, KWAN J, THOM N H. Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25(6): 326-335.
- [6] LIU H L, NG C W W, FEI K. Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over

- soft clay: case study [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133 (12): 1483-1493.
- [7] IN Y, CHUL E. Reinforcement and arching effect of geogrid-reinforced and pile-supported embankment on marine soft ground [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2007, 25(2): 97-118.
- [8] ALLEN T M, BATHURST R J. Soil reinforcement loads in geosynthetic walls at working stress conditions [J]. *Geosynthetics International*, 2002, 9(5/6): 525-566.
- [9] LAWTON E C, KHIRE M V, FOX N S. Reinforcement of soils by multioriented geosynthetic inclusions [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 119(2): 257-275.
- [10] HATAF N, BOUSHEHRAN A H, GHAHRAMANI A. Experimental and numerical behavior of shallow foundations on sand reinforced with geogrid and grid anchor under cyclic loading [J]. *Sci Iran Trans A*, 2010, 17(1): 1-10.
- [11] ZHANG M X, JAVADI A A, MIN X. Triaxial tests of sand reinforced with 3D inclusions [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2006, 24(4): 201-209.
- [12] ZHANG M X, ZHOU H, JAVADI A A, et al. Experimental and theoretical investigation of strength of soil reinforced with multi-layer horizontal-vertical orthogonal elements [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(1): 1-13.
- [13] DASH S K, KRISHNASWAMY N R, RAJAGOPAL K. Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2001, 19(4): 235-256.
- [14] DASH S K, SIREESH S, SITHARAM T G. Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2003, 21(4): 197-219.
- [15] MAKKAR F M, CHANDRAKARAN S, SANKAR N. Behaviour of model square footing resting on sand reinforced with three-dimensional geogrid [J]. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2017, 3(1): 3.
- [16] MAKKAR F M, CHANDRAKARAN S, SANKAR N. Experimental investigation of response of different granular soil-3D geogrid interfaces using large-scale direct shear tests [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(4): 04019012.
- [17] MAKKAR F M, CHANDRAKARAN S, SANKAR N. Performance of 3D geogrid-reinforced sand under direct shear mode [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 13(3): 227-235.
- [18] 符芬, 乔晓燕, 王钰涵, 等. 自膨胀止血材料的研究进展 [J]. *产业用纺织品*, 2024, 42(11): 1-8.
- [19] YOGARAJAH I, YEO K C. Finite element modelling of pull-out tests with load and strain measurements [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1994, 13(1): 43-54.
- [20] TRAN V D H, MEGUID M A, CHOUINARD L E. A finite-discrete element framework for the 3D modeling of geogrid-soil interaction under pullout loading conditions [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 37: 1-9.
- [21] 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.
- [22] WANG H L, CHEN R P, LIU Q W, et al. Soil-geogrid interaction at various influencing factors by pullout tests with applications of FBG sensors [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(1): 04018342.
- [23] WILSON-FAHMY R F, KOERNER R M. Finite element modelling of soil-geogrid interaction with application to the behavior of geogrids in a pullout loading condition [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1993, 12(5): 479-501.
- [24] MIRZAALIMOHAMMADI A, GHAZAVI M, ROUSTAEI M, et al. Pullout response of strengthened geosynthetic interacting with fine sand [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, 47(4): 530-541.
- [25] BERGADO D T, CHAI J C, ABIERA H O, et al. Interaction between cohesive-frictional soil and various grid reinforcements [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1993, 12(4): 327-349.
- [26] HUSSEIN M G, MEGUID M A. Improved understanding of geogrid response to pullout loading: insights from three-dimensional finite-element analysis [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2020, 57(2): 277-293.

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告