

DOI:10.11918/202410012

格栅横肋形状对加筋风积沙界面剪切强度的影响

马学宁, 白帆, 王乐

(兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070)

摘要: 为提高土工格栅对加筋风积沙的嵌固作用, 在普通双向格栅的基础上, 通过改变横肋的厚度和形状, 设计了4种新型横肋结构的土工格栅; 采用拉拔试验和离散元-有限差分耦合的方法, 研究了土工格栅横肋形状对风积沙加筋效果和机理的影响, 并引入了加筋效率评价筋土界面阻力, 确定了加筋风积沙的最优格栅横肋形状。在宏观层面上分析了不同横肋厚度和形状下拉拔力与拉拔位移的关系及加筋效率, 细观层面上研究接触力链和位移场的演化规律。研究表明: 横肋的形状和厚度对筋土界面抗剪强度影响很大, 4种新型横肋结构的格栅拉拔力约为普通双向格栅的1.1~3.6倍, 结合格栅用料比的概念, 得到菱形横肋结构的格栅加筋效率最高。通过细观分析发现, 在拉拔过程中, 拉拔端的强接触力链明显变密集; 与普通双向格栅相比, 菱形横肋结构格栅周围土体的接触力链演变趋势更为显著, 强应力链也更为密集, 说明横肋形状的改变能够调动更多的土颗粒抵制格栅的拔出。拉拔过程中土颗粒的位移相对于格栅的位移存在滞后性, 相同拉拔位移下, 菱形横肋结构的格栅周围土体参与度更高, 对土体的扰动也更大。

关键词: 土工格栅; 格栅横肋; 界面剪切强度; 拉拔试验; 离散元-有限差分耦合技术

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)11-0160-11

The influence of transverse rib shape on the interface shear strength of geogrid reinforced aeolian sand

MA Xuening, BAI Fan, WANG Le

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to improve the embedding effect of geogrid on reinforced aeolian sand, in this paper, four kinds of geogrids with new transverse ribs are designed by changing the thickness and shape of transverse ribs on the basis of ordinary biaxial geogrid. The pull-out test and DEM-FDM coupling method are used to study the influence of grid transverse ribs on the reinforcement effect and mechanism of aeolian sand. The reinforcement efficiency is introduced to evaluate the interface resistance characteristics of geogrid and soil, and the optimal geogrid transverse rib shape of reinforced aeolian sand is determined. The relationship between pullout force and pullout displacement and reinforcing efficiency under different thicknesses and shape of transverse ribs are analyzed at the macroscopic level. The evolution law of contact force chain and displacement field is studied at the mesoscopic level. The results show that the shape and thickness of the transverse ribs have a great influence on the shear strength of the reinforcement-soil interface. The pull-out force of the four new types of geogrids is about 1.1–3.6 times that of the ordinary biaxial geogrid. Combined with the concept of the material usage ratio of the geogrid, it is found that the rhombus transverse rib geogrid has the highest reinforcement efficiency. Through microscopic analysis, it is found that the strong contact force chain at the pull-out end is obviously denser during the pull-out process. Compared with the ordinary biaxial geogrid, the evolution trend of the contact force chain of the rhombus transverse rib geogrid is more significant, and the strong force chain is more denser, which indicated that the change of the shape and thickness of the transverse rib can mobilize more soil particles to resist the pull-out of the geogrid. During the pullout process, the displacement of the soil particles is lagging behind the displacement of the geogrid. Under the same pullout displacement, the participation of the surrounding soil of the rhombus transverse rib grid is higher than that of the biaxial geogrid during the pullout process, and the disturbance to the soil is also greater. The findings of this study can offer a significant reference for the development of new transverse rib geogrids and the reinforcement design of desert railway subgrades.

Keywords: geogrid; geogrid transverse ribs; interface shear strength; pull-out test; DEM-FDM coupling technique

收稿日期: 2024-10-09; 录用日期: 2024-11-25; 网络首发日期: 2025-08-22

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250822.0927.002>

基金项目: 国家自然科学基金(41562014, 42361019)

作者简介: 马学宁(1974—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 白帆, bfl73399@163.com

土工合成材料因其轻质、柔韧与耐久性在岩土工程中占重要地位,而加筋土结构则以其稳定性、可持续性和抗震性能展现工程优势。然而,筋土作用的复杂性导致荷载传递机制尚未完全揭示,成为加筋土工程中的一个研究难点^[1-2]。

常规筋土界面摩擦阻力试验主要测试土工格栅夹持端的拉拔阻力,忽略了力的传递过程,无法直接观测到力在筋土界面间的动态分布,限制了对界面力学行为的深入理解。传统测量方法仅提供静态力学参数,无法监测界面连续位移和应力场变化,影响了工程中对界面动态响应和长期稳定性的精确评估。

为克服传统试验的局限性,现代研究采用先进测试技术,如粒子图像测速技术(PIV),更全面地揭示筋土界面力学特性。王家全等^[3]通过拉拔试验和数字图像测量技术,探讨了不同类型砂土在拉拔过程中的峰值拉拔阻力、颗粒位移矢量和剪切带厚度等关键参数的演变规律。Venkateswarlu 等^[4]通过 PIV 技术分析,探究了格栅孔径尺寸和形状对界面剪切强度的影响。谭鹏等^[5]借助 PIV 技术测量了加筋影响带,研究了路基不同部位固废包裹层的厚度。刘文白等^[6]采用 PIV 直接测量了三轴剪切试样的轴向和径向变形,研究了加筋方式对加筋土变形和强度的影响规律。随着可视化技术在土工试验中的广泛应用和推广,土体位移场在筋土界面中的捕捉已变得准确且高效。然而,界面间荷载传递的机理仍需进一步深入研究^[7]。

为了填补物理试验存在的缺陷,国内外学者运用数值分析的手段,针对筋土界面的应力-应变关系和位移模式展开了研究。一些学者^[8-9]通过有限元方法,模拟了挡墙筋材、土体和墙面板的相互作用机制,研究了加筋土挡墙的筋材层数对其承载力影响规律及动荷载作用下筋条动拉力增量的变化规律。任非凡等^[10]利用弹塑性有限元方法,开展了岩质地区超高加筋土路基的数值模拟,探究了路基中附加应力的分布、筋材受力和变形规律等。胥昕怡等^[11]借助 FLAC2D 软件构建了加筋土桥台数值模型,通过对模拟得到的加筋土桥台受力与变形数据进行分析,与实际桥台的原型监测结果进行了细致的对比与验证。然而,当前依赖于有限元和有限差分法的模拟技术,尽管在宏观层面能够提供有效分析,但对于从细观尺度精准刻画筋土界面区域内土颗粒的位移与旋转状况而言,仍显不足。

为了深入研究筋土界面的细观特性,学者们通过离散元方法建模,探讨了不同因素对筋土界面相互作用的影响。一些学者^[12-14]通过离散元方法模

拟拉拔试验,研究了格栅界面砂土颗粒旋转方式和模型箱刚柔性边界条件对筋土界面相互作用的影响。Jia 等^[15]构建了三维离散元计算模型,探讨了双向土工格栅各向异性与剪切方向对筋土界面抗剪强度的影响,结果表明格栅各向异性对肋被动阻力具有重要影响。Feng 等^[16]采用离散元法模拟了格栅和非球形骨料之间的界面直剪试验,通过监测横肋的被动阻力和剪切带中的滑动接触百分比,揭示了其加固机制。邵帅等^[17]建立了土工格栅加筋道砟的三维离散元-有限元耦合模型,探究了加筋道砟在直剪作用下的力学行为试验和内在机理。余文颖等^[18]建立了离散元-有限差分耦合精细化格栅加筋道砟仿真模型,研究了格栅加筋对道砟细观力学性能的影响。尽管上述研究在理解筋土界面的细观特性方面取得了显著进展,但现有的土工格栅设计仍存在一些不足之处。

靳静等^[19]研究了格栅横肋间距对筋土界面相互作用的影响,发现减小横肋间距可以显著改善筋土界面的力学性能。Zeng 等^[20]则通过加厚土工格栅横肋从而提高了土工格栅-砂界面的界面抗剪强度。尽管上述研究为优化土工格栅横肋设计提供了重要参考,但仍需进一步探索如何通过改进横肋形状的设计来提升土工格栅的加筋效果。

因此,为深入研究土工格栅横肋几何形态对加筋风积沙界面力学行为的影响,本文基于风积沙的三轴试验、格栅拉伸试验及筋-土拉拔试验,采用离散元-有限差分耦合数值方法,对格栅横肋结构设计进行了优化,并从细观层面揭示了横肋结构对风积沙加筋作用机制的影响。研究成果可为沙漠地区加筋土结构及新型土工格栅的设计与优化提供理论支撑和技术参考。

1 模型建立与参数选取

1.1 数值耦合理论

在数值模拟中,有限差分法(FDM)与离散元法(DEM)的耦合分析已成为研究复杂地质与材料系统的重要工具。FDM 侧重于连续介质的宏观力学响应,采用显式拉格朗日算法及混合离散分区技术,将大变形问题转化为小变形范围内的本构关系,进而通过离散积分求解应力增量与不平衡力,实现对连续体力学行为的精确描述。DEM 则致力于颗粒材料的微观力学机制,依据颗粒间接触关系计算相互作用力与变形,从而模拟颗粒集合体的复杂动态过程。二者结合,可在多尺度层面协同揭示材料系统的力学响应。

在现代科学计算领域,离散-连续耦合迭代计

算技术以其独特的优势,成为了研究复杂物理现象的有力工具。离散-连续耦合迭代计算技术通过 Socket I/O 接口建立两个程序间的数据交换通道。在每次迭代中, FDM 模型首先在荷载作用下求解连续区域,更新节点速度,并通过接口传递给 DEM 边界墙体,实现速度连续。墙体运动促使离散颗粒位移,产生接触力,该力再经接口反馈至 FDM 模型,等效施加于相应边界节点,实现应力连续,从而在整个耦合过程中保持力学平衡与物理一致性。

1.2 试验与细观参数标定

采用颗粒流软件建立数值模型,为确定风积沙颗粒和土工格栅的物理性质,分别开展了三轴压缩试验、格栅拉伸试验和拉拔试验,并将试验结果与相应数值模拟结果进行对比,以此标定模型所需的细观参数。

1.2.1 三轴压缩试验

试验所用风积沙取自腾格里沙漠腹地,通过室内试验,得到了风积沙颗粒组成和物理力学参数;其中,图 1 为风积沙的粒径分布曲线,风积沙的相对密度 $G_s = 2.69$,最大干密度 $\rho_{dmax} = 1.73 \text{ g/cm}^3$,最优含水率 $w_{op} = 13.5\%$,黏聚力 $c_s = 5.5 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi_s = 35.6^\circ$ 。为获得能够准确反映风积沙细观力学特性的参数,分别在不同围压条件(15、30、60、90 kPa)下开展了一系列不固结不排水(UU)静三轴压缩试验,并同步进行了相应的颗粒流数值模拟分析。试验所用试样均按最优含水率制备,压实度控制为 95%,试样直径为 50 mm、高度为 100 mm。

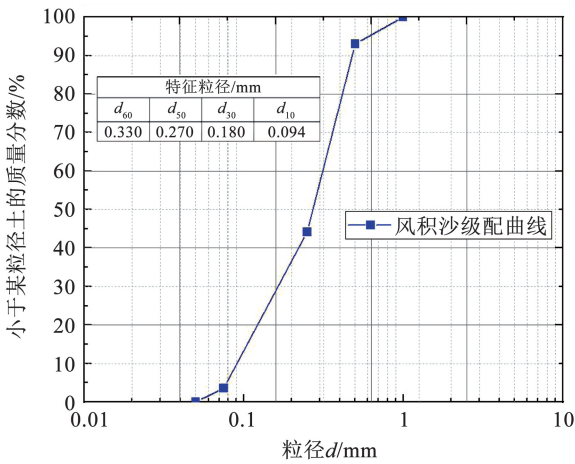


图 1 粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve

本文在三轴试验颗粒流数值模拟中,采用 FDM 软件中的 Shell 单元模拟橡胶膜,利用 DEM 中的 Ball 单元模拟风积沙颗粒,并选用抗转动接触模型表征颗粒间的接触行为。通过 Wall 单元实现了橡胶膜与颗粒间力与位移的传递,从而完成了两者的

耦合模拟。橡胶膜的相关参数参考 Zhang 等^[21]的橡胶膜拉伸试验结果取值,其中,橡胶膜的密度为 0.93 g/cm^3 ,厚度为 5 mm,弹性模量取为 1.0 MPa,泊松比为 0.4。

经过反复的参数调整与模型验证,最终确定了一个由 19 210 个 Ball 单元组成的颗粒流模型。图 2 为三轴试验示意图及颗粒流模型,风积沙细观参数标定结果:孔隙率为 0.35,摩擦系数为 0.32,有效模量 E^* 取 70 MPa,法向剪切刚度比 K^* 为 1.50,抗转动系数为 0.20。

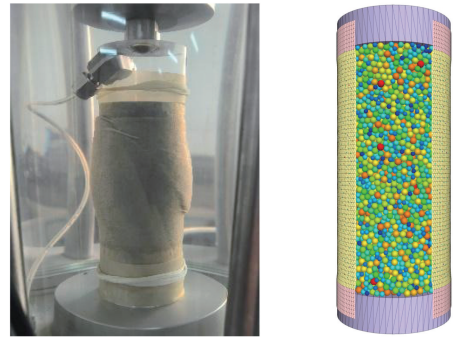


图 2 三轴压缩试验装置及数值模型

Fig. 2 Triaxial compression test device and numerical model

有效模量 E^* 是表征颗粒间接触弹簧刚度的宏观参数,计算公式为

$$E^* = K_n \times L/A \tag{1}$$

法向剪切刚度比 K^* 计算公式为

$$K^* = K_n/K_s \tag{2}$$

式中: K_n 、 K_s 分别为颗粒的法向与切向接触刚度; L 和 A 为根据接触类型(颗粒-颗粒或颗粒-墙面,见图 3)计算的几何参数,其计算公式为

$$A = \pi r^2 \tag{3}$$

$$r = \begin{cases} \min(R^{(1)}, R^{(2)}), & \text{球-球接触} \\ R^{(1)}, & \text{球-面接触} \end{cases} \tag{4}$$

$$L = \begin{cases} R^{(1)} + R^{(2)}, & \text{球-球接触} \\ R^{(1)}, & \text{球-面接触} \end{cases} \tag{5}$$

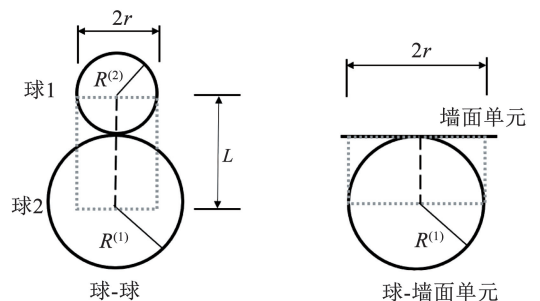


图 3 不同类型单元之间的接触形式

Fig. 3 Contact forms between different types of elements

图 4 展示了三轴试验结果与数值模拟结果的对比如,可以看出,模拟所得的风积沙应力-应变曲线与试验曲线在整体变化趋势上基本一致,且误差较小。两者之间的差异主要源于颗粒形状与分布的理想化假设。结果表明,所建立的数值模型及所选参数能够较好地反映风积沙在实际受力过程中的物理力学行为。

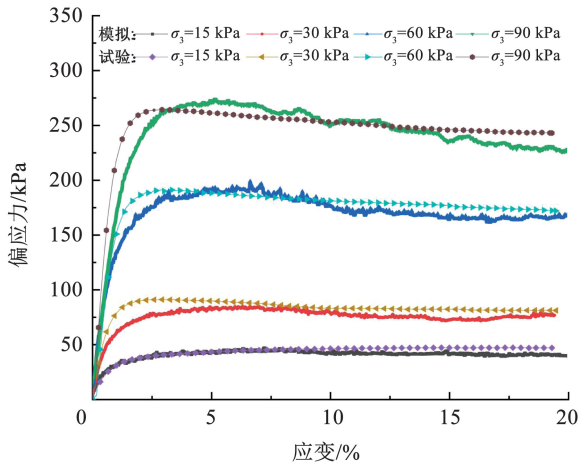


图 4 三轴试验结果与模拟的对比

Fig. 4 Comparison between triaxial test and simulation results

1.2.2 格栅拉伸试验

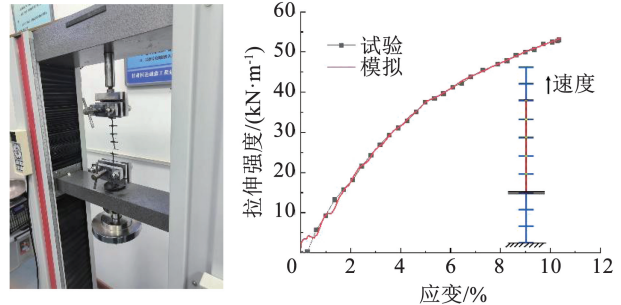
本试验采用的土工格栅为聚丙烯材质的双向格栅。格栅孔尺寸为 $19\text{ mm} \times 19\text{ mm}$, 肋宽为 2 mm , 肋厚为 1 mm , 密度为 $1\ 000\text{ kg/m}^3$, 泊松比为 0.33 。根据文献[22]中规定,采用单肋法进行拉伸试验。试验过程中,试样被固定在夹具上,夹具间距设定为 100 mm ,拉伸速度控制在 20 mm/min 。试验步骤按照文献[23]中的相关规定进行,通过试验得到格栅的极限拉伸强度为 53.01 kN/m ,最大应变为 10.34% 。

图 5 为格栅单肋条拉伸试验及结果对比。可以看出,格栅在拉伸试验中表现出明显的非线性应力-应变关系,其刚度随拉伸应变的增加逐渐降低。在数值模拟中,采用有限差分法中的 Zone 单元对格栅进行建模,并选用各向同性本构模型描述其力学行为。模型尺寸与实际情况保持一致,同时通过分段函数准确表征格栅的非线性应力-应变响应。表 1 列出了不同应变下格栅的弹性模量。在模拟过程中,格栅一端固定,另一端施加恒定速率拉伸,计算程序在不同应变区间暂停,以调整刚度参数并与试验数据匹配。图 5 中对比结果表明,模拟曲线与试验结果高度吻合,验证了采用分段弹性模量模拟方法在各拉伸阶段的准确性与有效性。

表 1 土工格栅分段弹性模量取值

Tab. 1 Value of segmented elastic modulus for geogrid

应变区间/%	<0.5	0.5~<2	2~<3	3~<5	5~<7	7~<9	≥9
弹性模量/GPa	5.70	9.63	7.85	6.00	3.73	2.93	2.60



(a) 拉伸试验装置

(b) 试验与模拟结果对比

图 5 单肋条拉伸试验及结果对比

Fig. 5 Single rib tensile testing and comparison of results

1.2.3 拉拔试验

为确定土工格栅与风积沙颗粒界面细观接触参数,开展了室内拉拔试验。试验模型箱长 \times 宽 \times 高 = $469\text{ mm} \times 220\text{ mm} \times 203\text{ mm}$, 格栅总长度为 530 mm , 埋入土体中的有效长度为 460 mm 。土工格栅的宽度设定为 150 mm , 在其与试验箱两侧之间各保留 35 mm 的空隙, 以此减轻边界效应带来的干扰。模型填筑完成后, 将试样静置 12 h 进行固结。最后, 将刚性荷载板放置在填土顶面, 通过施加不同法向压力 (15 、 30 、 60 、 90 kPa) 进行拉拔试验。关于拉拔速率 v 的选取, 学者们进行了不同拉拔速率对筋土界面参数影响的研究^[24-26], 研究表明: 当速率 v 较小时, 剪切带内的颗粒有更充分的时间进行重排, 筋-土之间的嵌固与咬合作用更加明显, 颗粒转动错动较少, 水平位移较大; 而在较高速率 v 下, 颗粒重排时间不足, 运动形式主要表现为转动, 导致筋土相互作用强度降低。本文研究对象为风积沙, 颗粒相对均匀, 且细粒含量较低, 拉拔速率对拉拔阻力的影响较小^[24], 因此, 结合规范^[27]的相关规定, 选取拉拔速率 $v = 0.5\text{ mm/min}$ 。

本文数值模拟建立的模型与室内拉拔试验的模型尺寸相同。将颗粒流软件中的 Ball 单元与有限差分软件中的 Zone 单元通过 Wall 单元进行耦合, 以实现离散元和有限差分软件之间不平衡力和位移的相互转换, 确保数值模拟和试验的一致性。在拉拔试验数值模型中, 采用了“Distribute”成样法, 根据区域体积和孔隙率计算颗粒体积, 进而计算出颗粒数量。考虑到计算速度和模拟精度的要求, 模型

中选择土颗粒粒径在 2.55 ~ 4.25 mm 之间且均匀分布,平均粒径为 3.4 mm。文献[28-29]指出,当模拟颗粒的平均粒径不大于模型整体尺寸的 1/30 时,即使对颗粒尺寸进行适当放大,其对模拟结果精度的影响也较为有限。所建模型的初始状态如图 6 所示,模型包含了 78 034 个 Ball 单元的风积沙颗粒和 15 468 个 Zone 单元的土工格栅。风积沙与土工格栅之间的接触采用线性接触模型,其接触微观参数取值为:有效模量为 120 kPa,法向剪切刚度比为 1.5,摩擦系数为 0.2。

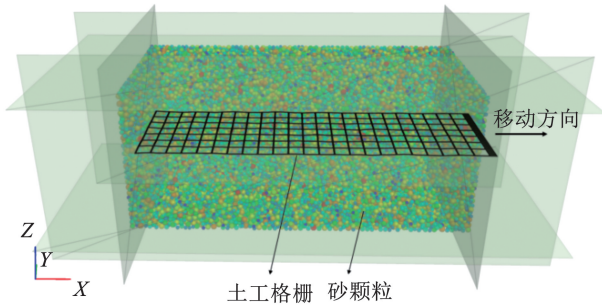


图 6 拉拔试验离散元-有限差分耦合数值模型

Fig. 6 Coupling model of DEM-FDM for pull-out test

为了确保试样内部接触均匀,利用伺服函数通过周围墙体对试样施加预压荷载。通过控制加载板的竖向运动速度,向试样施加特定的法向荷载。参考相关文献的研究成果^[13,30-31],并综合考虑动态效应与计算效率的影响,将拉拔速率设置为从初始值 0 开始线性增加,直至达到 0.3 m/s 后保持恒定,在此过程中,记录各类变量随拉拔位移的变化关系。

图 7 展示了双向格栅在拉拔过程中拉拔力与拉拔位移的关系曲线,图中标注了不同工况下对应的峰值拉拔力。

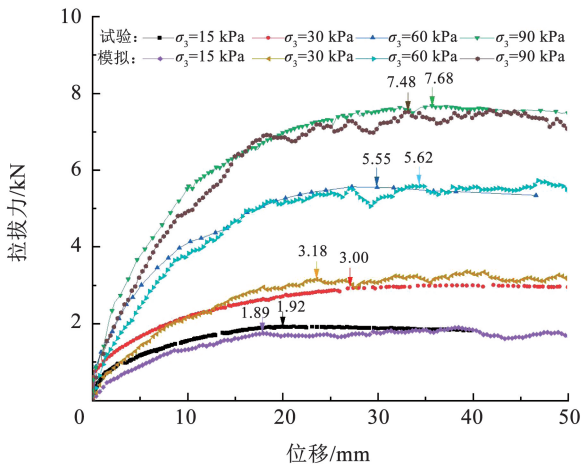


图 7 拉拔力-位移曲线

Fig. 7 Pull-out force-displacement curve

可以看出,在初始阶段,拉拔力与拉拔位移近似呈线性增长关系;随着位移进一步增大,拉拔力的增长速率逐渐减缓,并在达到峰值后出现小幅下降。法向压力的增加显著提高了峰值拉拔力,同时其所对应的拉拔位移也相应增大。在相同法向应力条件下,数值模拟结果与试验数据吻合较好,两者曲线变化趋势基本一致,拟合效果良好,验证了本文所建立的拉拔试验数值模型的合理性。值得注意的是,数值模拟曲线中存在一定波动,其原因在于拉拔过程中土工格栅横肋被逐渐拔出时,部分颗粒间的互锁作用瞬时释放,从而引起拉拔力的起伏变化。

2 不同横肋格栅拉拔试验数值模拟

根据包承纲^[32]的研究可知,当土工格栅在土体中移动时,嵌固效应占据主导地位,占总阻力的 90%,而摩擦阻力仅占总阻力的 10%。因此,为增强土体与土工格栅间的界面阻力,提升加筋土结构稳定性,优化土工格栅的嵌固性能至关重要。基于此,本文创新性地探索横肋的形态对土工格栅嵌固性能的影响研究。

2.1 土工格栅横肋的设计

图 8 设计了除普通双向格栅 (standard biaxial geogrid, SBG) 外的 4 种新型横肋结构的土工格栅。即保持格栅纵肋数量和间距不变的前提下,仅改变横肋的形状。其中,节点加厚 1 mm (node thickened geogrid, NTG) 是在 SBG 的节点处上、下各加厚 1 mm;横肋加厚 1 mm (uniform ribbed geogrid, URG) 是在 SBG 整个横肋上、下各加厚 1 mm,横肋总厚度为 3 mm;横肋加厚 2 mm (heavy ribbed geogrid, HRG) 是在 SBG 整个横肋上、下各加厚 2 mm,横肋总厚度为 5 mm;菱形横肋结构土工格栅 (diamond structure geogrid, DSG) 为 SBG 节点处上、下各加厚 2 mm,同一横肋相邻两节点的中部位置保持 1 mm,其余部分线性变化,其目的是增加格栅节点处横肋的抗弯刚度,以期提升菱形横肋结构格栅的嵌固效果。设计这些新型横肋结构的格栅旨在增强风积沙与筋材的嵌固效应,以期提升加筋土结构的稳定性。

表 2 统计了不同横肋结构的格栅的用料比。本文定义用料比为单位长度新型横肋结构的格栅所用材料与普通双向格栅所用材料的比值。这对于综合比较选择合适的格栅结构具有重要意义。

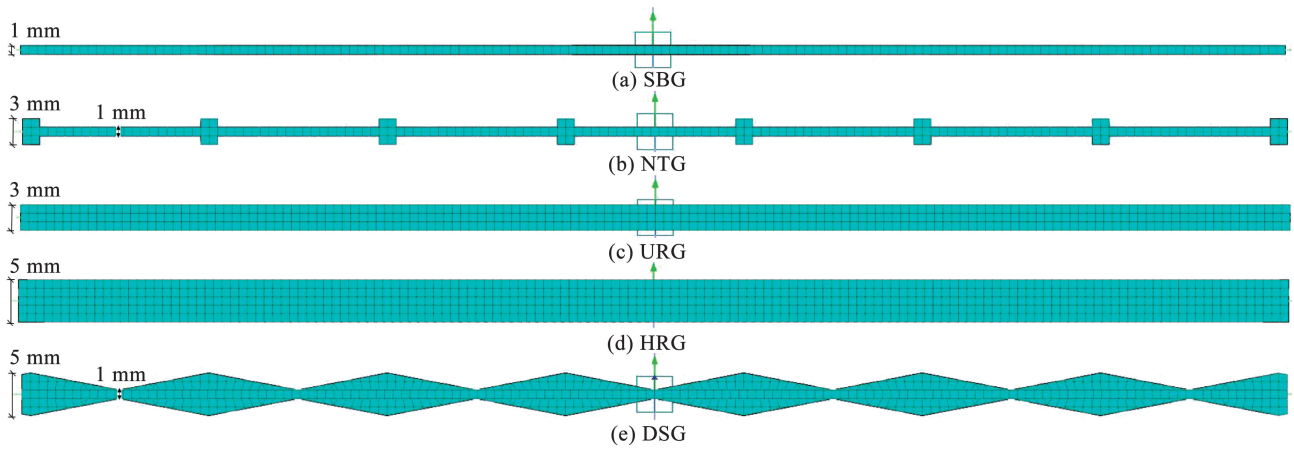


图 8 不同横肋结构的土工格栅

Fig. 8 Geogrids with different transverse rib structure

表 2 不同格栅的用料比

Tab. 2 Material usage ratio of different geogrids

格栅类型	单位长度格栅体积/($\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)	用料比
SBG	13.30	1.00
NTG	14.70	1.11
URG	26.50	1.99
DSG	26.50	1.99
HRG	39.70	2.99

2.2 不同横肋格栅的拉拔试验模拟

采用前述确定的细观参数,在不同的法向荷载条件下,分别对 4 种新型横肋结构的格栅进行拉拔试验模拟,探究土工格栅横肋形状对其与风积沙界面剪切响应的影响。图 9 为 4 种新型横肋结构的格栅模型。模型中格栅所包含的 Zone 单元数分别为 16 877、29 800、51 842 和 44 277 个,试验结果如图 10 所示,图中标注的数字为相应格栅的峰值拉拔力。

由图 10 可见,在相同法向压力条件下,新型横肋结构的土工格栅的峰值拉拔力均比普通双向格栅的大。其中节点加厚的格栅增强效果不明显,其峰值拉拔力仅比普通双向格栅略大一点,但整体加强横肋结构的土工格栅的峰值拉拔力明显提高,其中横肋加厚 2 mm 的最大,横肋加厚 1 mm 的最小,菱形横肋结构的居中。值得注意的是,横肋加厚 1 mm 的格栅与菱形横肋结构的格栅用料比相同,但菱形横肋结构土工格栅的峰值拉拔力比横肋加厚 1 mm 的格栅增大约 1.2 倍,说明在格栅节点两侧增大横肋高度可显著提高筋土嵌固效果。具体来说,节点加厚的格栅峰值拉拔力约为普通双向格栅的 1.1 倍,横肋加厚 1 mm 和 2 mm 的格栅峰值拉拔力约为普通双向格栅的 2.5 倍和 3.6 倍,菱形横肋结构土工格栅的峰值拉拔力约为普通双向格栅的 2.9 倍,这表明加强格栅横肋在提高砂土界面剪切强度方面表现得更优秀。

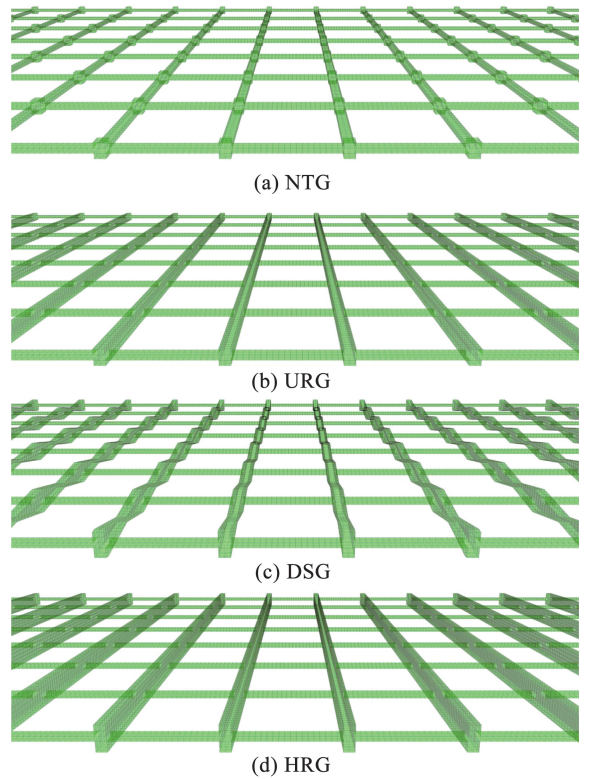


图 9 4 种新型横肋的格栅模型

Fig. 9 Geogrid models of four new types of transverse rib

2.3 评价指标与讨论

本文依据文献[27]规定的界面阻力系数(砂-土工格栅的界面抗剪强度与砂的抗剪强度之比)计算方法,获取了评价界面摩擦强度的关键参数。

利用式(6)可计算出风积沙与土工格栅界面的峰值抗剪强度:

$$\tau = \frac{T_d}{2L \cdot B} \quad (6)$$

式中: τ 为筋土界面抗剪强度, kPa; T_d 为最大拉拔力, kN; L 、 B 分别为试验箱中土工格栅的长度和宽度, m。

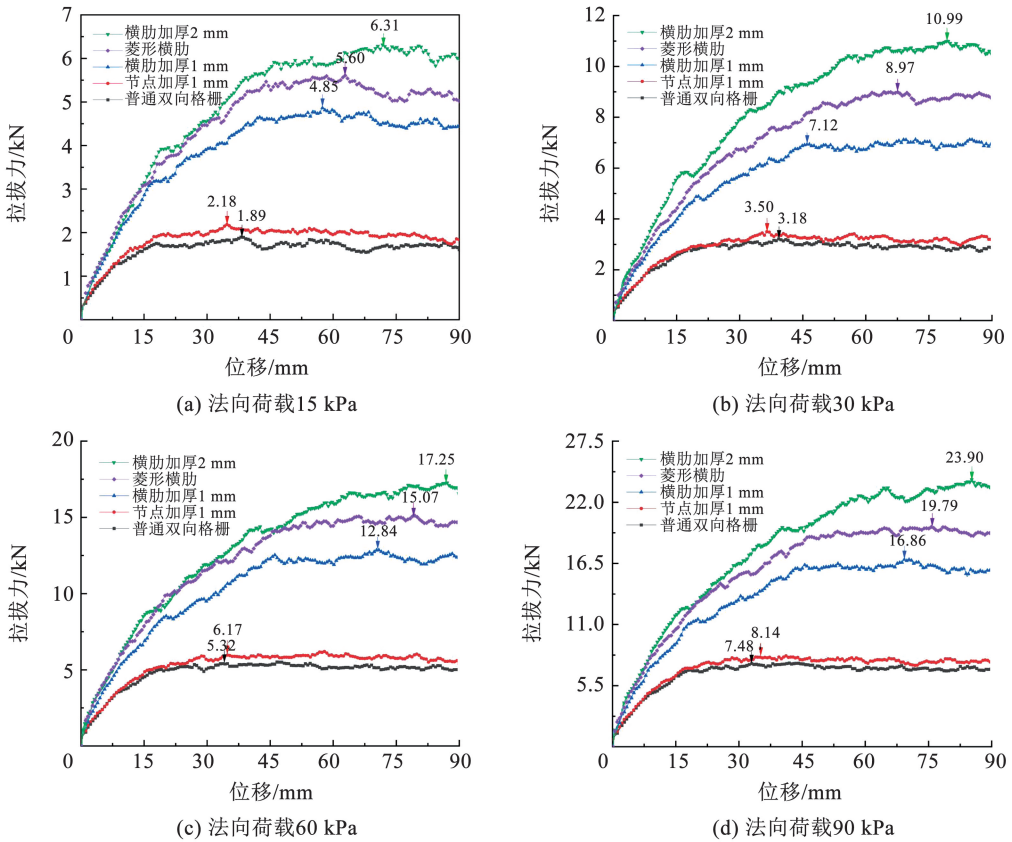


图 10 不同横肋结构的格栅拉拔力-位移曲线

Fig. 10 Pull-out force-displacement curves of geogrids with different transverse rib structures

依据拉拔试验结果,可绘制不同横肋形状格栅的法向应力与最大剪应力的关系曲线,得到风积沙-土工格栅界面抗剪强度包线,如图 11 所示,该线的倾角就是格栅与风积沙的界面摩擦角 φ_{sg} 。

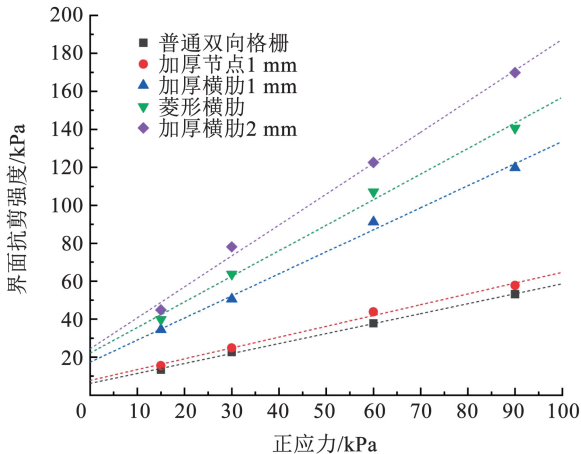


图 11 界面抗剪强度包络线

Fig. 11 Shear strength envelope line of interface

依据式(7)可得到不同横肋形状的土工格栅的界面阻力系数 f_{sg} (表 3):

$$f_{sg} = \frac{\tan \varphi_{sg}}{\tan \varphi_s} \quad (7)$$

式中 φ_s 为土体的内摩擦角, ($^\circ$)。

由于不同横肋结构的格栅用料不同,在追求高界面阻力系数的时候也需考虑经济性。此处引入加

筋效率的概念,其为界面阻力系数比与格栅用料比的比值(其中界面阻力系数比为各格栅界面阻力系数与普通双向格栅界面阻力系数的比值),表示格栅单位用料的抗拉拔效果。当加筋效率大于 1.0 时,代表与普通双向格栅相同的成本时,可以获得比其更高的加筋效率。

表 3 界面阻力系数 f_{sg}

Tab. 3 Interface resistance coefficient f_{sg}

格栅类型	$\varphi_{sg}/(^\circ)$	f_{sg}
SBG	27.7	0.733
NTG	29.6	0.793
URG	49.3	1.624
DSG	53.4	1.881
HRG	58.5	2.279

表 4 为不同横肋结构的格栅在风积沙中的加筋效率。可以看出,在成本考量下,菱形横肋的格栅展现出最高的加筋效率,优于横肋加厚 1 mm 的格栅,而节点加厚的格栅的加筋效率最低。菱形横肋和横肋加厚 1 mm 的格栅的加筋效率分别比普通双向格栅高 30% 和 11%,主要因为加厚横肋增强了风积沙与格栅的界面相互作用,提高了格栅的嵌固性能。值得注意的是,菱形横肋和横肋加厚 1 mm 格栅用料完全相同,但菱形横肋结构的格栅加筋效率比横肋加厚 1 mm 格栅高出 17%,表明横肋的形状对拉拔结果影响显著,且在节点两侧加厚横肋的土工格

栅的嵌固效果更佳。由此可见, 菱形横肋结构的土工格栅展现出巨大潜力, 可在实际工程中推广应用。

表 4 加筋效率

Tab. 4 Reinforcement efficiency

格栅类型	界面阻力系数比	加筋效率
SBG	1.00	1.00
NTG	1.08	0.98
URG	2.22	1.11
DSG	2.58	1.30
HRG	3.12	1.05

根据以上结果与讨论可以看出, 菱形横肋在增大格栅的摩擦嵌固作用方面表现最好, 后文将其与普通双向格栅进行细观对比分析。

3 拉拔试验的细观分析

在进一步探索菱形横肋结构的土工格栅与风积沙相互作用机制, 深入研究筋土界面细观层面相互作用行为具有非常重要的意义。这将有助于为沙漠路基的加筋设计提供更科学、更准确的依据。

3.1 接触力链

为探究拉拔过程中风积沙内部接触力链的分布

及其演变规律, 将接触力分为强接触力和弱接触力, 通过删除弱接触力链, 获得强接触力链分布图。图 12 为竖向荷载为 15 kPa 下普通双向格栅和菱形横肋结构格栅在不同拉拔位移时的接触力链演变图, 图中 S 为拉拔位移, 拉拔方向向右。由图 12 可见, 不同拉拔位移条件下, 普通双向格栅和菱形横肋结构的格栅的拉拔过程中, 土体内的整体力链演化规律相似。在拉拔前, 竖向荷载作用下拉拔箱土体内部接触力链集中分布在下半部分, 但沿着格栅拉拔方向近平均分布。当拉拔位移为 24 mm 时, 拉拔箱中强接触力链明显变密集, 强接触力大多分布在横肋前侧, 且方向偏向拉拔端, 表现为锯齿状分布; 拉拔箱中格栅上下部分的接触力逐渐均匀化, 但格栅后端有部分强接触力链消失, 刚性后壁附近出现了明显的应力空洞。当拉拔位移为 48 mm 时, 拉拔端附近格栅上下两侧存在明显的应力集中现象, 越靠近拉拔端, 应力集中现象越明显, 强接触力链是从拉拔端向自由端逐渐延伸。当拉拔位移为 72 mm 时, 拉拔端应力集中现象显著增强。

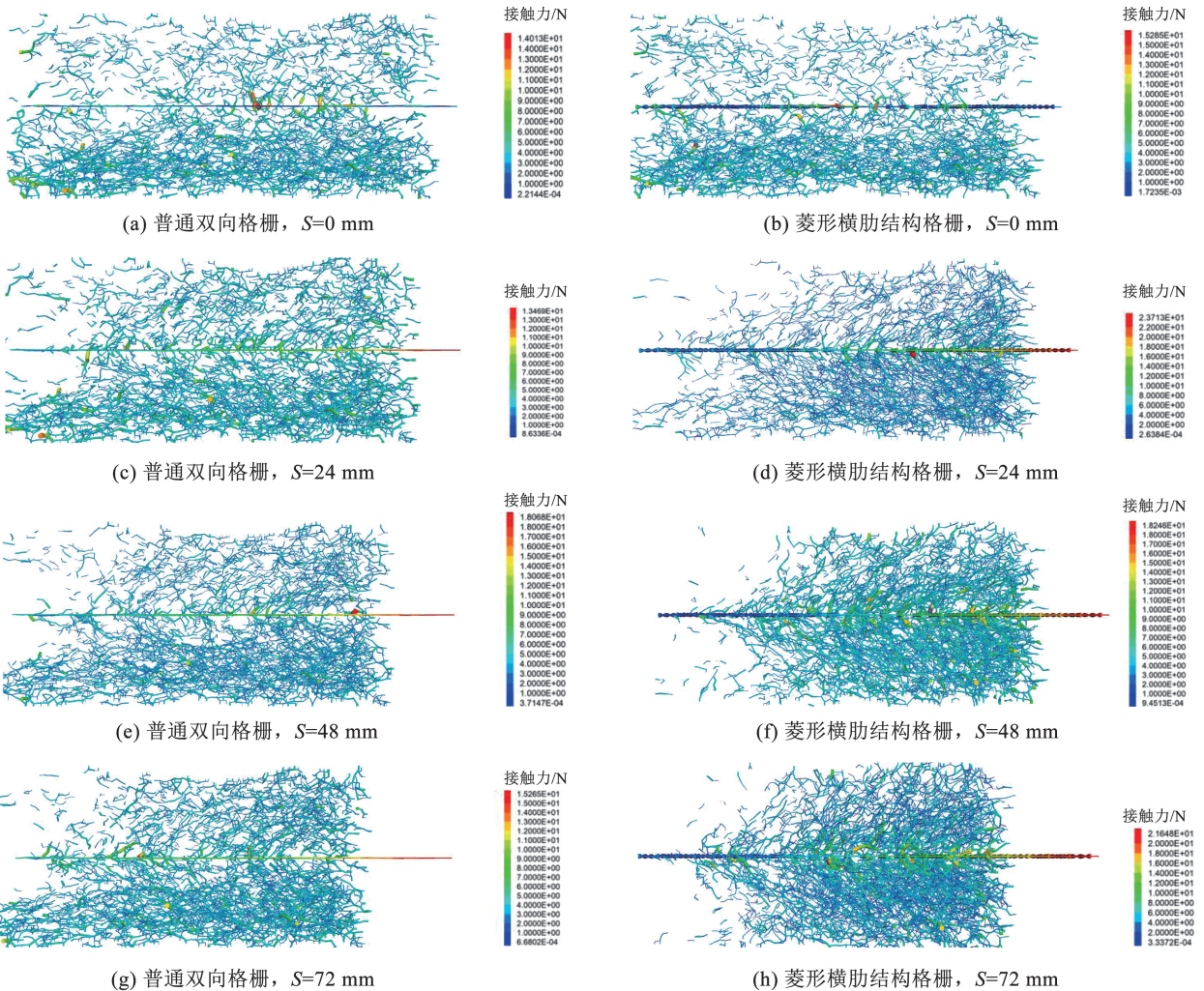


图 12 风积沙内部接触力链的分布及其演变

Fig. 12 Distribution and evolution of internal contact force chain in aeolian sand

与普通双向格栅相比,菱形横肋结构的格栅周围土体的接触力链演变趋势更为显著,强力链也更为密集,说明改变格栅横肋的形状能够明显调动更多的土颗粒参与到抑制格栅拉出的过程中,从而有效的提高格栅的峰值拉拔力。

3.2 位移场分析

图 13 为竖向荷载 15 kPa 下两种格栅在不同拉拔位移时的颗粒位移场,拉拔方向向右。可以看出,相对于格栅的位移,土颗粒的位移存在一定的滞后性。对于普通双向格栅而言,当拉拔位移为 24 mm 时,格栅上、下两侧的土颗粒位移基本呈现出均匀分

布,最大位移为 11.6 mm;当拉拔位移从 48 mm 增加到 72 mm 时,土颗粒位移从 16.3 mm 增大到 24.2 mm,土颗粒位移最大值从格栅的中部向后部偏移。对于菱形横肋结构的格栅而言,拉拔位移从 24 mm 增加到 72 mm,土颗粒位移从 12.0 mm 增加到 38.7 mm,土颗粒的位移集中区域从前端到中部最后转移到后部。土颗粒位移集中区域的移动主要是由于在拉拔的过程中,拉拔箱前侧的孔隙率逐渐减小,土颗粒变密集,出现应力集中,在一定程度上会阻碍土颗粒的进一步向前移动;而在格栅后端随着土颗粒的移动,孔隙率增大,颗粒移动较为容易。

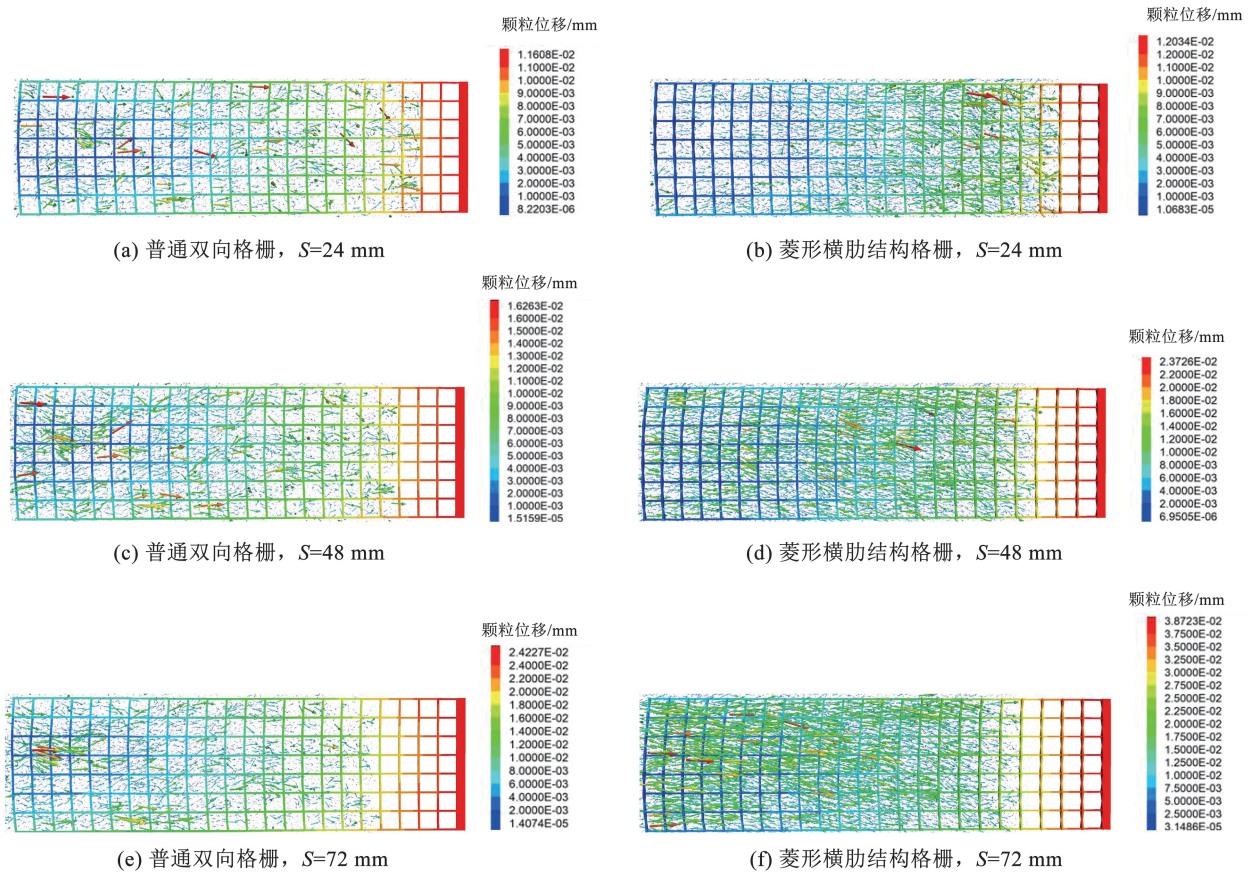


图 13 两种格栅拉拔过程中位移场

Fig. 13 Displacement field during the pull-out process of two types of grids

相同拉拔位移下,菱形横肋结构的格栅周围土颗粒位移比普通双向格栅更大,分布更为密集,这表明菱形横肋结构的格栅在拉拔过程中周围土颗粒的参与度更高,对土体的扰动也更大。另外还可看出,相同拉拔位移下,菱形横肋结构的格栅的局部形变率更大,说明不规则加厚格栅横肋,提高了格栅横肋节点两侧的嵌固作用,从而增大格栅的抗拉拔能力。通过图中不同格栅的位移分区界限可以看出,格栅的位移分区界限呈现出指向拉拔方向的弧形曲线,且这一现象越接近格栅自由端越明显。说明在拉拔过程中,格栅两侧相对于中部受力变形过早,在一定

程度上影响了拉拔过程中格栅的整体刚度和稳定性。

4 结 论

- 1) 采用离散元与有限差分耦合数值计算方法,可有效地模拟土工格栅与风积沙的相互作用行为。
- 2) 横肋的形状和厚度对土工格栅-风积沙界面抗剪强度影响较大,新型横肋结构的格栅拉拔力约为普通双向格栅的 1.1~3.6 倍,菱形横肋结构的土工格栅加筋效率最高。
- 3) 与普通双向格栅相比,随格栅拉拔位移的增

大, 菱形横肋结构的格栅周围土体的强接触力链在拉拔端更为密集, 演变趋势更为显著, 说明菱形横肋结构的格栅能够调动更多的土颗粒参与, 增大格栅的嵌固作用, 提高格栅的峰值拉拔力。

4) 拉拔过程中土颗粒位移相对于格栅位移存在一定的滞后性。相同拉拔位移下, 菱形横肋结构的格栅周围土颗粒的位移比普通双向格栅更大, 分布更为密集, 土颗粒的参与度更高, 界面阻力系数更高。

5) 菱形横肋结构的格栅凭借其独特的设计和优越的界面抗剪强度, 可在软基处理、高填方路基加固和边坡防护等复杂地质条件和工程环境中发挥重要作用。

参考文献

- [1] ALAGIYAWANNA A M N, SUGIMOTO M, SATO S, et al. Influence of longitudinal and transverse members on geogrid pullout behavior during deformation [J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2001, 19(8): 483
- [2] LI L H, CHEN Y J, FERREIRA P M V, et al. Experimental investigations on the pull-out behavior of tire strips reinforced sands [J]. *Materials*, 2017, 10(7): 10070707
- [3] 王家全, 祁航翔, 林志南, 等. 基于数字图像分析土工合成材料加筋砂土拉拔试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(12): 3259
WANG Jiaquan, QI Hangxiang, LIN Zhinan, et al. Pull-out test on geosynthetic reinforced sand based on digital image analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(12): 3259
- [4] VENKATESWARLU H, SAIKUMAR A, LATHA G M. Sand-geogrid interfacial shear response revisited through additive manufacturing[J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2023, 51(4): 95
- [5] 谭鹏, 李海, 李享平, 等. 基于 DIC 技术的固废粒料包裹格栅加筋试验研究[J]. *中外公路*, 2024, 44(4): 1
TAN Peng, LI Hai, LI Xiangping, et al. Experimental study on reinforced geogrid of construction and demolition wastes based on DIC technology[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2024, 44(4): 1
- [6] 刘文白, 陈子祎, 苏丽娟. 基于数字图像测量技术的加筋土三轴试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(增刊 2): 41
LIU Wenbai, CHEN Ziyi, SU Lijuan. Study on the triaxial test of reinforced soil based on digital image processing technique [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(Sup. 2): 41
- [7] 陈榕, 栾茂田, 赵维, 等. 土工格栅拉拔试验及筋材摩擦受力特性研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(4): 960
CHEN Rong, LUAN Maotian, ZHAO Wei, et al. Research on pull-out test and frictional resistance characteristic of geogrids [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(4): 960
- [8] 彭芳乐, 曹延波. 加筋砂土挡墙筋材层数影响的有限元分析 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(11): 1700
PENG Fangle, CAO Yanbo. FEM analysis of effect of reinforced layer numbers on bearing capacity and deformation of reinforced-sand retaining walls [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 33(11): 1700
- [9] 李澄宙. 加筋土挡墙的动力仿真分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2016, 13(5): 848
LI Chengzhou. Numerical simulation on dynamic behavior of reinforced earth retaining wall [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2016, 13(5): 848
- [10] 任非凡, 徐超, 许强, 等. 山区超高加筋土路基力学行为的有限元分析[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(3): 101
REN Feifan, XU Chao, XU Qiang, et al. Finite element analysis on the mechanics behavior of super-high reinforced earth embankment in mountainous areas [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(3): 101
- [11] 胥昕怡, 徐超. 基于原型监测的分离式加筋土桥台工作性能数值分析[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(2): 234
XU Xinyi, XU Chao. Numerical analysis on working performance of separated reinforced soil abutment based on prototype monitoring [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2024, 45(2): 234
- [12] 马强, 吴峰, 肖衡林. 土工格栅-玻璃砂界面细观特性离散元研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(8): 151
MA Qiang, WU Feng, XIAO Henglin. DEM study on interface performance of geogrid-reinforced glass sand [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(8): 151
- [13] 王志杰, 杨广庆, 王贺, 等. 刚性及柔性顶部边界下筋土界面特性的细观数值研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(5): 967
WANG Zhijie, YANG Guangqing, WANG He, et al. Mesoscopic numerical studies on geogrid-soil interface behavior under rigid and flexible top boundary conditions [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(5): 967
- [14] 杜炜, 聂如松, 李列列, 等. 考虑不同边界条件的风积沙-土工格栅拉拔试验离散元模拟研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(6): 1849
DU Wei, NIE Rusong, LI Lielie, et al. Discrete element simulation on aeolian sand-geogrid pull-out test with different boundary conditions [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(6): 1849
- [15] JIA Y F, ZHANG J, CHEN X Y, et al. DEM study on shear behavior of geogrid-soil interfaces subjected to shear in different directions [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 156: 105302
- [16] FENG S J, WANG Y Q. DEM simulation of geogrid-aggregate interface shear behavior: optimization of the aperture ratio considering the initial interlocking states [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 154: 105182
- [17] 邵帅, 严颖, 季顺迎. 土工格栅加强下有砟铁路道床动力特性的离散元-有限元耦合分析[J]. *固体力学学报*, 2016, 37(5): 444
SHAO Shuai, YAN Ying, JI Shunying. Discrete-finite element analysis of dynamic behaviors of ballasted railway with geogrid reinforcement [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2016, 37(5): 444
- [18] 余文颖, 徐扬, 张景昱, 等. 基于离散元-有限差分耦合方法的格栅加筋道砟力学性能分析[J]. *中国铁道科学*, 2024, 45(4): 40
YU Wenyong, XU Yang, ZHANG Jingyu, et al. Study on the mechanical properties of geogrid reinforced ballast based on DEM-FDM coupling method [J]. *China Railway Science*, 2024, 45(4): 40
- [19] 靳静, 温馨, 梁小勇, 等. 不同横肋间距的土工格栅界面特性宏细观研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2025, 22(4): 1602
JIN Jing, WEN Xin, LIANG Xiaoyong, et al. Macroscopic and

- mesoscopic study of geogrid interfacial properties with different transverse rib spacing [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2025, 22(4): 1602
- [20] ZENG W X, LIU F Y, ZHU X X, et al. Discrete element method investigation of shear behaviour of 3D geogrid-sand interface[J]. *Geosynthetics International*, 2024, 31(2): 00289
- [21] ZHANG J, WANG X, YIN Z Y, et al. DEM modeling of large-scale triaxial test of rock clasts considering realistic particle shapes and flexible membrane boundary[J]. *Engineering Geology*, 2020, 279: 105871
- [22] ASTM International. Standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib tensile method; ASTM D6637-01[S]. West Conshohocken: ASTM, 2023
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 土工合成材料—塑料土工格栅; GB/T 17689—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. *Geosynthetics plastic geogrids: GB/T 17689—2008* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008
- [24] 王家全, 林鸿, 韦林邑, 等. 土工格栅与砾性土界面特性的拉拔试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(8): 1711
WANG Jiaquan, LIN Hong, WEI Linyi, et al. Study on interface characteristics of geogrid and gravel soil by pullout test[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(8): 1711
- [25] 王家全, 王梦莲, 唐毅, 等. 高中低拉拔速率下筋土界面拉拔试验分析[J]. *工业建筑*, 2024, 54(4): 142
WANG Jiaquan, WANG Menglian, TANG Yi, et al. Pullout tests and analysis of reinforced soil interfaces at high, medium and low pullout rates[J]. *Industrial Construction*, 2024, 54(4): 142
- [26] 肖成志, 路遥, 郑鸿, 等. 加筋土结构筋-土界面特性和筋材位移变化规律试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(4): 29
- XIAO Chengzhi, LU Yao, ZHENG Hong, et al. Experimental study on interface properties between geogrids and sand and reinforcement displacement distribution of reinforced soil structures based on pullout tests[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(4): 29
- [27] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程土工合成材料试验规程: JTG E50—2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006
Ministry of Transport of the People's Republic of China. *Test methods of geosynthetics for highway engineering: JTG E50—2006* [S]. Beijing: China Communications Press, 2006
- [28] 毛海涛, 黄海均, 严新军, 等. 非饱和紫色土三轴试验颗粒流宏观观参数关系研究[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(3): 711
MAO Haitao, HUANG Haijun, YAN Xinjun, et al. Numerical study on macroscopic and microscopic parameters of particle flow in unsaturated purple soil triaxial test [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(3): 711
- [29] 刘海涛, 程晓辉. 粗粒土尺寸效应的离散元分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(增刊1): 287
LIU Haitao, CHENG Xiaohui. Discrete element analysis for size effects of coarse-grained soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(Sup.1): 287
- [30] LI Jing, JIA Yafei, MIAO Chenxi, et al. Discrete element analysis of the load transfer mechanism of geogrid-ballast interface under pull-out load[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020(5): 1
- [31] MIAO C X, ZHENG J J, ZHANG R J, et al. DEM modeling of pullout behavior of geogrid reinforced ballast: the effect of particle shape[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017(81): 249
- [32] 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
BAO Chenggang. Study on interface behavior of geosynthetics and soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(9): 1735
- [33] MEGALLY S H, SILVA P E, SEIBLE F. Seismic response of sacrificial shear keys in bridge abutments [R]. San Diego: Department of Structural Engineering, University of California, 2002
- [34] XIANG Nailiang, LI Jianzhong. Effect of exterior concrete shear keys on the seismic performance of laminated rubber bearing-supported highway bridges in China [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018(12): 185
- [35] 中华人民共和国交通部. 公路桥梁地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019
Ministry of Transport of the People's Republic of China. *Specifications for design of foundation of highway bridges and culverts: JTG 3363—2019* [S]. Beijing: China Communication Press, 2019
- [36] CALTRANS. Seismic design criteria: division of structures [S]. Sacramento: California Department of Transportation, 2010
- [37] BAKER J W, LIN T, SHAHI S K, et al. New ground motion selection procedures and selected motions for the PEER transportation research program [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2011
- [38] NIELSON B G. Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005
- [39] ANA J, DANIEL P, RUBÉN Z. A multivariate Kolmogorov-Smirnov test of goodness of fit [J]. *Statistics & Probability Letters*, 1997, 35(3): 251

(上接第 159 页)