

多层格栅加筋道砟界面联动-互扰行为

苗晨曦^{1,2}, 张 威¹, 朱孝振³, 陈小艺⁴, 张 军²

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西省交通科技研发公司, 山西 太原 030000;

3. 五冶集团上海有限公司, 上海 200000; 4. 商丘工学院 土木工程学院, 河南 商丘 476000)

摘要: 探究多层加筋土体系中筋材-道砟间合理间距对拉拔抗力的影响。通过改进传统单层格栅-道砟拉拔数值试验模型, 实现了多层格栅等位移幅值下的同步拉拔的离散元模拟。数值模型采用刚性颗粒簇模拟道砟颗粒非球形特征, 并运用黏结颗粒串模拟受力均匀的三向土工格栅, 同时考虑了道砟颗粒间的嵌固效应和土工格栅的拉伸特性。以平均拉拔力、特定层位处界面强度与筋材应变为指标, 科学识别多层格栅加筋道砟界面联动行为, 并从颗粒尺度系统揭示了多层加筋体系层间互扰机制。结果表明, 多层格栅的拉拔力和增长速率小于单层格栅, 尤其在高压向应力下差异更明显, 且存在不均匀性。随着加筋层数增加, 筋材抗力差异显著, 同时摩擦耗能增大。层间颗粒位移存在叠合, 导致筋材宏观力学响应减弱, 其内在原因是颗粒力链发育不够充分。法向接触力分析结果进一步表明, 多层格栅加筋体系下的层间互扰可能导致法向接触力分布的不稳定性。

关键词: 土工格栅; 道砟; 多层拉拔试验; 互扰机制

中图分类号: TU443

文献标志码: A

Mutuality-Interference Behavior of Multi-Layer Geogrid Reinforced Ballast

MIAO Chenxi^{1,2}, ZHANG Wei¹, ZHU Xiaozhen³,
CHEN Xiaoyi⁴, ZHANG Jun²

(1. School of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Transportation Research Institute Group Co. Ltd., Taiyuan 030027, China; 3. China MCC5 Group Ltd., Shanghai 200000; 4. School of Civil Engineering, Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu 476000, China)

Abstract: The influence of the appropriate spacing between reinforcement and ballast on the performance of pullout resistance in multi-layer reinforced soil structures were explored. By improving the conventional single-layer geogrid-ballast pullout numerical test model, discrete

element simulations of synchronized pullout under equivalent displacement amplitudes for multi-layer geogrids were achieved. The rigid clump particles were used in the numerical model to mimic the non-spherical characteristics of the ballast particles, and bonded particle strings were incorporated to simulate the uniformly loaded triaxial geogrid, by considering both particle interlocking effects within the ballast and the tensile behavior of the geogrid. Using criteria such as average pull-out force, interfacial strength at specific layer positions, and strain in the reinforcement, the interfacial coupled behavior between multi-layer geogrid-reinforced ballast was scientifically determined, and the interlayer interference mechanism within the system was investigated at the particle scale. The results show that the pull-out force and its rate of increase in multi-layer geogrids are lower than those in single-layer geogrids, especially at high normal stresses, and there is non-uniformity. As the number of reinforcement layers increases, significant differences in the resistance of the reinforcement are observed, along with an increase in the frictional energy dissipation. Overlapping interlayer particle displacements weaken the macroscopic mechanical response of the reinforcement because of insufficient development of particle force chains. Subsequent investigation of normal contact forces indicates that inter-layer interference in multi-layer geogrid-reinforced structures may lead to instability in the distribution of normal contact forces.

Keywords: geogrid; ballast; multilayer pull-out test; disturbance mechanism

碳达峰、碳中和目标的提出, 彰显了我国在全球

收稿日期: 2023-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(52178341, 52278360, 51809191); 山西省基础研究计划(202303021224001)

第一作者: 苗晨曦, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通岩土工程。

E-mail: miaochenxi@tyut.edu.cn

通信作者: 张 军, 正高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为加筋土结构。E-mail: zj_sxjt@hotmail.com



论文
拓展
介绍

气候治理上的大国担当,也为碳排放占比过半的建筑工程行业提出了新的要求,绿色低碳已然成为基础设施建设的关键指标之一^[1]。加筋土是一种提升土体承载力和稳定性的有效方式,其核心在于土体和筋材之间的摩擦、嵌锁作用弥补了土体抗拉、抗剪性能的不足。较传统建筑材料而言,土工合成材料生产和加筋土结构施工过程的碳排放量显著减少。在挡墙^[2]、桥台^[3]、桩承式路堤^[4]等工程应用场景中替代或部分置换水泥、钢材等高碳材料是降低交通基础设施全寿命周期内碳排放量的有力举措,也是技术层面加速双碳目标达成的重要途径。肖成志等^[5]基于拉拔试验研究了拉拔速率、含水量及填土压实度等对筋土界面相互作用特性影响,从宏观力学方面分析了筋材位移的演变规律。王家全等^[6]基于可视化拉拔系统,研究了粗粒含量对界面强度、颗粒位移演化及筋材应变的影响。李水江等^[7]采用大型直剪仪对双向循环作用筋土界面动力剪切特性进行研究,明确了荷载作用类型对筋土界面剪切强度的影响。Miao等^[8]通过对格栅加筋碎石道砟拉拔行为的颗粒流模拟,从颗粒尺度系统分析了位移调动模式以及能量分配机制等,研究了道砟棱角特性对加筋性能的影响及其作用机理。

全面审视关于筋-土相互作用的研究成果发现,借助直剪、拉拔试验及相关数值方法等手段进行筋土相互作用分析时筋材往往单层布置,这与工程实践中筋材分区域多层布置现状存在较大出入。在非单层格栅加筋行为研究层面,赵雨滕等^[9]通过单剪试验,研究了单层、双层和三层格栅与砂土间的相互作用,指出砂土中铺设土工格栅对筋土界面的影响,相当于人为设置了软弱界面,格栅布设层数与整体抗剪强度之间不存在显著的线性关系。陈成等^[10]采用自制多层格栅拉拔设备对铺设单、双层格栅进行抗拔试验,并结合离散元方法分析了拉拔过程中颗粒体系内部细观结构演化情况,证实了格栅层间互扰行为的存在。

同时,现行规范^[11]在进行加筋土挡墙内部稳定性验算时假定区域内各层筋材抗力一致,并据此确定该区域内筋材抗拉强度、铺设层数等设计参数,实际工程中不同层位处筋材抗力发挥与调动机制尚不明确。尤其对于以格栅加筋为路径的重载铁路道床堆集体工程补强而言,受限于道床(规范规定最大道床层厚度为70 cm)与道砟(特级道砟最大粒径为63 mm)尺寸,道床有限高度范围内筋材合理间距问题就显得更为重要。为此,本文通过特定高度道砟层

内不同层数格栅数值拉拔试验,以平均拉拔力为指标评价格栅层数对其加筋效果的影响,分析颗粒体系位移调动、能量耗散、接触力链及其各向异性演化规律,揭示多层加筋道砟体系宏观强度发展与细观组构演化的关联,探究多层加筋道砟联动互扰行为。研究成果可为加筋土结构服役性能提升及其设计方法改进提供技术支持,并为交通基础设施领域高碳材料减量使用提供生态、耐久的解决方案。

1 有限高度范围内多层格栅加筋道砟拉拔试验离散元模型

参考刘泽等^[12]对筋材铺设参数优化的相关研究成果,本文设置单层、三层、五层格栅3种试验工况,其中单层格栅铺设于加载箱中部,多层格栅沿模型箱高度方向等间距铺设,加载箱尺寸为300 mm×300 mm×1 200 mm($x \times y \times z$),并视加筋层数进行分层处理,具体试验工况见图1。

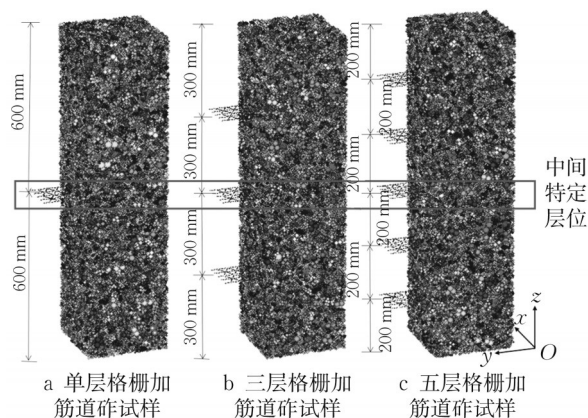


图1 多层格栅加筋道砟试样

Fig. 1 Specimens for ballast reinforced with different geogrid layers

在单层格栅-道砟数值拉拔试验框架^[8]的基础上扩充加筋层数,开展多层格栅加筋拉拔试验,格栅、道砟本构模型与细观参数均沿用文献^[8]标定成果,具体参数见表1。以三层格栅加筋道砟试样生成为例简述试样生成及拉拔试验步骤如下:①在图1中,把三层格栅加筋道砟试样中加筋间距沿加载箱竖向将其等分成4层,形成4个独立颗粒生成域及3条层间拉拔通道。在各独立加载箱内按图2级配生成纯球型颗粒,采用Clump方法置换成为类三角形道砟颗粒,充分循环消散不平衡力至指定水平。②在各层加载箱内,分别引入伺服机制对分层试样施加100 kPa法向应力进行预压缩以保证格栅引入前

界面处应力水平。③删除拉拔通道上下边界墙体,引入土工格栅,格栅网孔裁剪形式与相对位置均与文献[8]一致(如图3所示),开启循环步数,重新定义顶墙与底墙间伺服机制,调整法向应力至目标水平。④统一计算时步至各工况最小稳定时步以下,清零颗粒速度、位移等信息,施加恒定速度至格栅拉拔端将每层格栅同步拉出90 mm,记录其格栅拉拔力、位移、轴力等数据信息。最终3种工况下格栅加筋道砟试样的生成如图1所示。

需要说明的是,根据Stahl等^[13]的研究结果,本研究中将格栅与模型边界墙的最小距离调整为50 mm,并将墙体摩擦系数设为0,足以消除边界条件的影响。本文在数值模拟步骤、模型细观参数选取、边界条件等方面均与文献[8]一致,仅仅是面向多层格栅界面联动互扰行为表征问题,有针对性地对格栅层数进行扩充并开展多层格栅同步拉拔试验。受限于篇幅,不再赘述模型验证过程。

表1 道砟与土工格栅细观参数^[8]

Tab. 1 Microstructure parameters of ballast and geogrid^[8]

项目	颗粒密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	法向刚度 $k_n / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	切向刚度 $k_s / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	平行黏结法向强度/Pa	平行黏结切向强度/Pa	平行黏结法向刚度	平行黏结切向刚度	平行黏结半径乘数	孔隙率	摩擦系数
格栅	800	1.77×10^7	0.88×10^7	5.68×10^{11}	5.68×10^{11}	4.56×10^8	4.56×10^8	0.50		0.50
道砟	2700	0.52×10^8	0.52×10^8						0.45	0.45

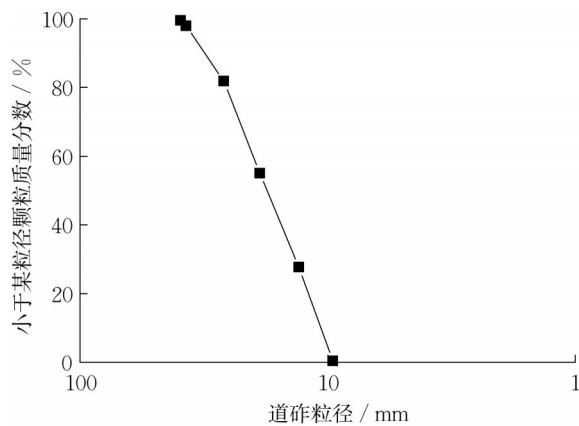


图2 道砟级配曲线^[8]

Fig. 2 Particle size distribution of ballast^[8]

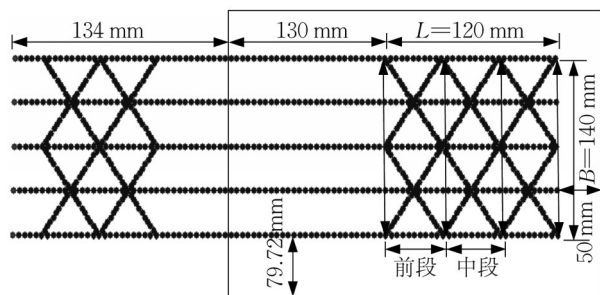


图3 格栅性状与平面布设图

Fig. 3 Characteristic and plan layout of geogrid

2 多层格栅加筋道砟界面联动行为

2.1 平均拉拔力与界面摩擦强度

图4为四级法向应力(σ_n)下不同层数格栅平均拉拔力随拉拔位移变化关系曲线。由图4可知,在

拉拔初期(拉拔位移 <10 mm),单层格栅和多层格栅的拉拔力增长速率相近。随着拉拔过程的推进,多层格栅拉拔力峰值和增长速率均小于单层格栅,其差异程度与法向应力水平高度关联。法向应力越高,平均拉拔力差异越明显且起始分化所对应的拉拔位移越小。仅从50 kPa法向应力作用下拉拔力峰值来看,单层、三层、五层格栅的平均拉拔力峰值分别为6 307.94、5 085.58、4 482.59 N,三层格栅、五层格栅所对应的平均拉拔力较单层格栅减小的比例约为19.38%、28.94%,可见试样整体抗力与筋材层数间并不存在线性关系,同等拉拔位移条件下筋材抗力发挥并不一致。这是因为在拉拔力峰值状态下颗粒体系被充分调动,已达细观承载结构的承载极限。此时筋材与料(砂土、碎石等)的强相互作用区域在拉拔方向上沿筋材呈带状分布^[14-16]。相邻层位的强相互作用区可能存在交叉区域,这些交叉区域内的颗粒同时受上、下层筋材的影响,加剧了拉拔抗力与筋材层数之间的非线性关系。

为进一步阐明法向应力对单层和多层格栅加筋道砟的影响,参照《公路工程土工合成材料试验规程》^[17]拉拔试验中界面摩擦强度计算方法,按式(1)计算界面剪应力,并以3种工况中间层位处(如图1所示)界面强度为指标,评价筋材铺设层数对加筋性能的影响。

$$\tau = \frac{F_{\max}}{2LB} \quad (1)$$

式中: τ 为界面抗剪强度; F_{\max} 为拉拔力峰值; L 、 B 分别为图3所有效加筋区域的长度和宽度。

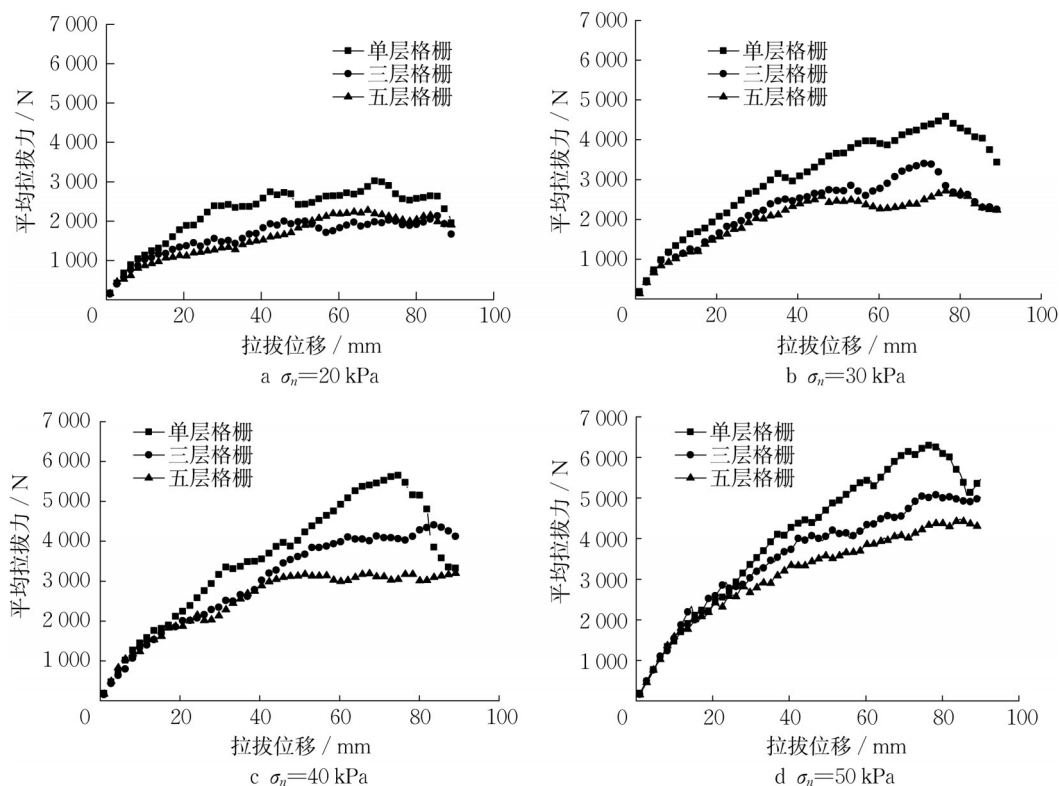


图4 不同法向应力下平均拉拔力-拉拔位移变化曲线

Fig. 4 Average pullout force versus pullout displacement under different conditions

图5给出了不同工况下中间层位处格栅道砟界面强度与法向应力的线性拟合结果,不同工况下整体抗剪强度发展趋势与平均拉拔力发展趋势类似,均表现为五层格栅<三层格栅<单层格栅。以单层格栅抗剪切强度为基准,三层、五层加筋工况下中间层界面抗剪强度分别折减约31%、36%。相较于平均拉拔力指标而言,中间层位处筋土相互作用衰减幅度更加显著。分析原因,土工格栅提供的拉拔力主要来源于筋材与填料间的摩擦嵌锁力,而多层格栅的铺设使得每层格栅在拉拔过程中并非独立,填料颗粒不再唯一服务于特定层格栅,层间颗粒调动存在互扰,充分的填料调动在多层加筋体系中难以实现,宏观表现为拉拔响应的层位不均匀性。

2.2 格栅应变

既有研究结果表明^[18],拉拔荷载所引起的格栅变形响应主要集中于筋材中前部网孔,筋材后部多处于小变形状态下的平动。

图6选取40 kPa法向应力下中间层位处格栅前、中段应变(测点位置如图3所示)进行分析。由图6可知,多层格栅加筋工况下格栅由前及后的渐进调动机制与单层格栅加筋无异,但在筋材调动程度上区别显著,具体表现为随着拉拔位移的增大单

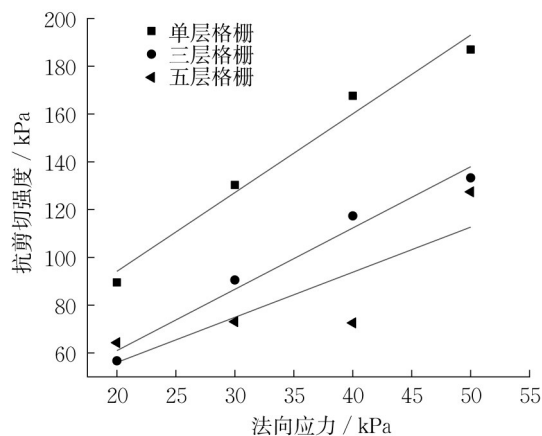


图5 格栅-道砟界面抗剪切强度拟合

Fig. 5 Interface strength fitting of reinforced ballast

层格栅的前段应变增长速率明显增大,而多层格栅的前段应变增长相对平缓。这是因为单层格栅的拉拔阻力较多层格栅在试样高度方向上较为集中。以单层格栅峰值拉拔力对应的前段应变为基准进一步分析表明,三层、五层格栅峰值拉拔力对应的前段应变分别减少约30%和65%。这种变化伴随着加筋层数的增加,在特定层位处引起筋材抗力发生显著变化。

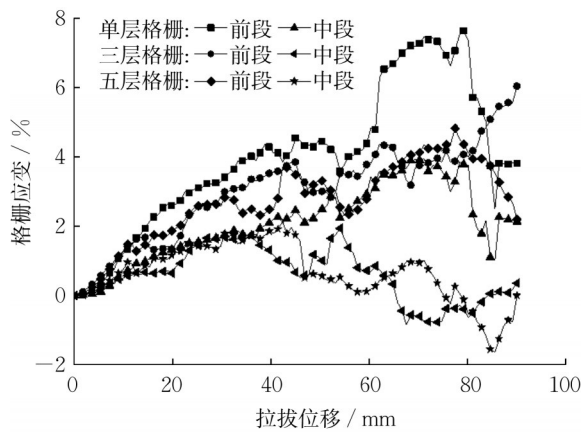


图6 格栅分段应变随拉拔位移的变化

Fig. 6 Geogrid segmental strain versus pull-out displacement

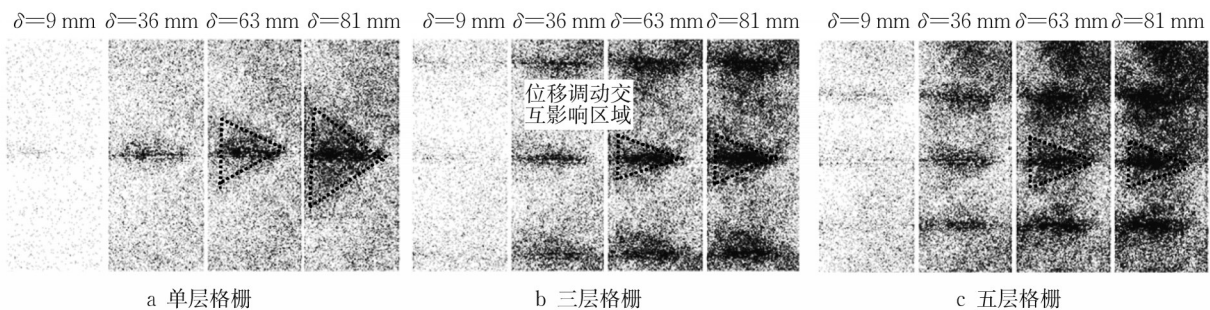


图7 不同拉拔位移下的颗粒位移分布矢量图

Fig. 7 Vector of particle displacement distribution at different pull-out displacement

碎颗粒的强调动区域出现叠合,进一步解释了前序多层加筋工况下筋材抗力发挥衰减的内在原因。

3.2 颗粒体系能量耗散

已经形成共识^[19]的是,拉拔过程中加筋土体系内部存在一个相对稳定的能量分配机制,即输入功主要转化为摩擦耗能和筋材应变储能,颗粒体系动能和弹性势能占比很小可忽略不计。图8为40 kPa法向应力下各工况平均拉拔力峰值所对应的能量耗散瞬时状态。由图8可知,摩擦耗能占比随着格栅层数的增加相应增大,格栅应变储能占比对应降低,摩擦耗能、筋材应变储能在总输出功中的占比出现分化。多层加筋工况下,摩擦耗能的提高在于更大范围内颗粒得到调动,但从调动程度而言,格栅层间颗粒服务于其上下两层格栅,其对格栅的约束限制能力均有所减弱,多层加筋互扰下层间筋土相互作用衰减是筋材拉拔力、应变等宏观力学响应弱化的内在原因。

3.3 法向接触力及其细观组构演化

散体颗粒的宏观强度取决于颗粒间法向接触力

3 多层格栅加筋道碎界面联动-互扰机制

3.1 颗粒体系位移调动

图7为40 kPa法向应力下颗粒体系位移矢量图。由图7可知,随着拉拔过程的推进,多层工况下试样内部高灰度区域逐渐积聚密集,这显然是不同层位处拉拔荷载作用下填料得到调动的细观反应。以灰度为指标定性界定颗粒强调动区域,如图7中三角形虚线所示,分析拉拔中后期中间特定层位处位移调动可知,单层格栅工况下三角形状强调动区域更加明显,区域外颗粒调动区分度也更加明显,而三层、五层格栅工况此层位处颗粒位移调动范围较小,且易与其上下层间位移调动存在交叉,筋材对道

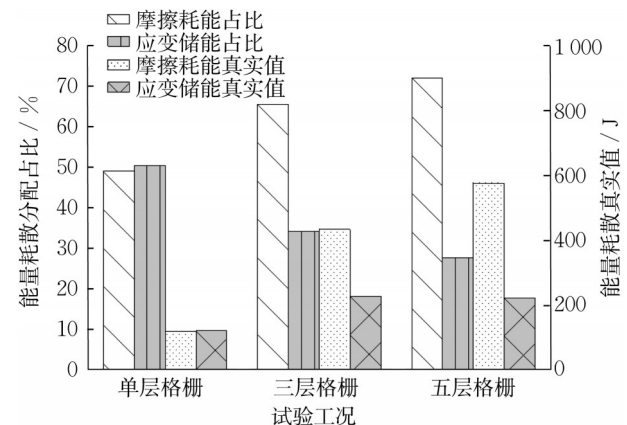


图8 不同加筋层数下能量耗散分配

Fig. 8 Energy dissipation distribution at different reinforcement layers

及其各向异性演化^[20]。图9为40 kPa法向应力下拉拔位移为72 mm时颗粒接触力链法向分量yOz平面投影图。由图9可知,单层格栅工况已经发育出完整的横八字形强力链。类似于颗粒位移调动,受层间互扰的影响,三层、五层加筋工况接触力链无法形成可清晰识别的横八字形力链,也就是说,多层加筋

体系下颗粒承载骨架发育不良,宏观上表现为平均拉拔力的显著降低。值得一提的是,五层格栅工况层间接触力呈现出明显的波浪形特征且凸向拉拔出口处,这可能与实践中加筋土挡墙的层间侧向鼓出病害存在关联。

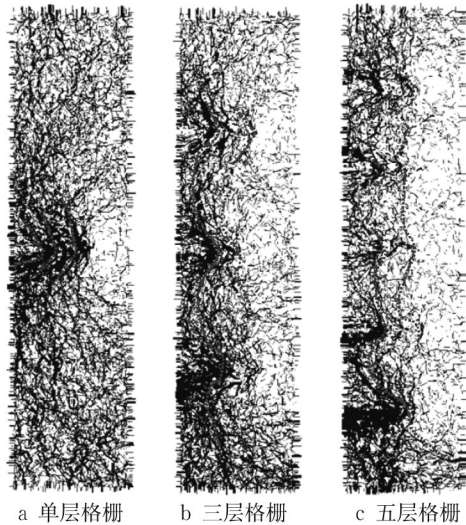


图 9 不同加筋层数下的颗粒接触力链
Fig. 9 Contact force chain at different reinforcement layers

采用文献[21]中提出的二阶傅里叶函数进一步拟合量化法向接触力发育情况,平面统计范围限定为文献[8]中的格栅完整网孔区域,并考虑五层格栅层间间距, z 方向统计范围限定为中间层格栅至其上方 40 mm 处。以 9、72 mm 两级特征位移分别表征拉拔初期与拉拔中后期,图 10 为 40 kPa 法向应力下统计区域内的法向接触力,其中 α_n 代表法向接触力各向异性的傅里叶级数, θ_n 代表法向接触力的各向异性主方向。

由图 10 可知,各向各工况下法向接触力主方向接近于竖直方向,拉拔水平荷载所引起的主应力偏转尚不明显,随着拉拔过程的推进,唯有单层格栅加筋工况“花生形”法向接触力玫瑰图得以保持,这是横八字形力链充分发育的定量表征。需要说明的是,三层、五层工况下法向接触力的各向异性程度与偏转角度拟合结果的标准差较大,层间互扰机制下傅里叶函数是否仍为最优拟合函数存疑。但从平均法向接触力实测值来看,拉拔中后期接触力均值从单层加筋的 6.78 N,衰减至了三层、五层加筋的 4.81、4.31 N,接触数目亦呈现出类似的弱化特征,法向接触力的定量分析结果进一步佐证了层间互扰机制的客观存在。

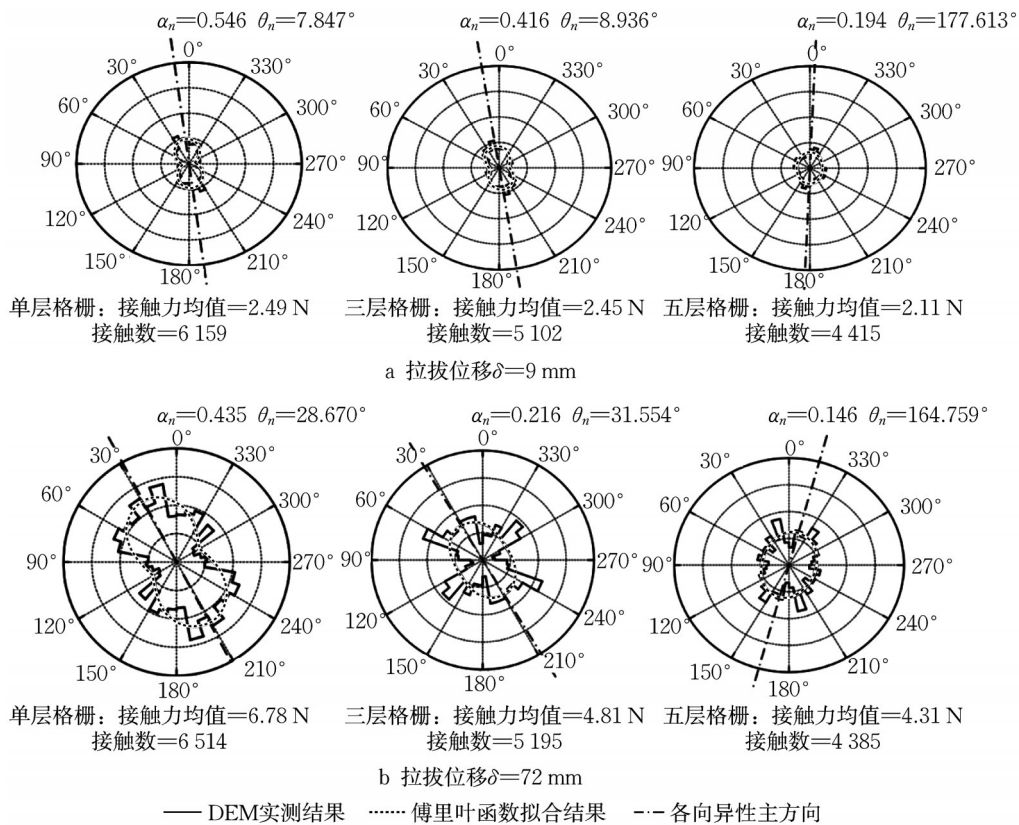


图 10 同一层位处的法向接触力及其各向异性演化

Fig. 10 Normal contact force and its anisotropy evolution at the same reinforcement position

4 结论

本文通过特定高度道砟层内不同层数格栅数值拉拔试验,研究了格栅层数对其宏观加筋效果的影响,分析了颗粒体系位移调动、能量耗散、接触力链及其各向异性演化规律,从宏-细观尺度揭示了多层格栅加筋道砟界面联动-互扰行为。主要研究结论如下:

(1)多层格栅的拉拔力峰值和增长速率小于单层格栅,尤其在高压向应力下差异更明显。层间颗粒调动互扰导致多层格栅的拉拔响应不均匀。设计中需在整体抗力和经济性间平衡,合理选择格栅加筋层数。

(2)多层格栅与单层格栅在拉拔过程中表现出相似的调动机制,但多层格栅的前段应变增长相对平缓。随着加筋层数增加,特定层位筋材抗力发挥出现显著差异。同时,摩擦耗能随着格栅层数增加而增大,而格栅应变储能占比相应减少。

(3)多层加筋体系下层间颗粒位移调动存在叠合,多层格栅拉拔过程中表现出更广泛的填料调动,但层间互扰导致筋材宏观力学响应减弱。多层加筋工况下筋材的平均拉拔抗力衰减的内在原因是强相互作用区内的颗粒被相邻层位的格栅交叉调动导致颗粒力链发育不够充分。

(4)单层格栅在拉拔力峰值时已形成主方向明确的横八字形强力链,而多层加筋的接触力呈现出局部集中特征。法向接触力的分析结果进一步表明了层间互扰可能导致颗粒间法向接触力的不稳定分布。

作者贡献声明:

苗晨曦:程序设计与实现。

张威:数值模拟与图表处理。

朱孝振:细观分析。

陈小艺:组构演化分析。

张军:试验设计,研究方案制定。

参考文献:

- [1] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告2020[J]. 建筑节能, 2021, 49(2):1.
China Association of Building Energy Efficiency. China building energy consumption research report 2020 [J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(2):1.
- [2] 高珊, 肖成志, 丁鲁强, 等. 台阶式加筋土挡墙面板水平位移与稳定性的关系研究[J]. 岩石力学与工程, 2023, 42(1):235.
- [3] 王裘申, 徐超, 张振, 等. 交通荷载下加筋土桥台工作性能试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(12):3416.
WANG Qiushen, XU Chao, ZHANG Zhen, et al. Experimental study on working performance of reinforced soil abutment subjected to traffic loads [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(12):3416.
- [4] ZHUANG Yan, CUI Xiaoyan. Case studies of reinforced piled high-speed railway embankment over soft soils [J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(2):06015005.
- [5] 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, 2024, 46(4):29.
XIAO Chengzhi, LU Yao, ZEHNG Hong, et al. Experimental study on interface properties between geogrids and sand and reinforcement displacement distribution of einforced soil structures based on pullout tests [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(4):29.
- [6] 王家全, 康博文, 周圆兀, 等. 填料粗粒含量对筋土界面拉拔性状的影响[J]. 岩土力学, 2022, 43(5):1249.
WANG Jiaquan, KANG Bowen, ZHOU Yuanwu, et al. Effect of coarse particle content on pull-out behavior of reinforced-soil interface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(5):1249.
- [7] 李水江, 童艳光, 王军, 等. 双向循环荷载作用下砾石-格栅界面动力剪切特性[J]. 岩土力学, 2022, 43(S2):291.
LI Shuijiang, TONG Yanguang, WANG Jun, et al. Cyclic shear properties of gravel-geogrid interface under bidirectional cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S2):291.
- [8] MIAO C X, JIA Y F, ZHANG J, et al. DEM simulation of the pullout behavior of geogrid-stabilized ballast with the optimization of the coordination between aperture size and particle diameter [J]. Construction and Building Materials, 2020, 255(3): 119359.
- [9] 赵雨朦, 徐东升, 刘华北. 土工格栅与砂土相互作用的单剪试验研究[J]. 岩石力学与工程, 2018, 37(S1):3722.
ZHAO Yumeng, XU Dongsheng, LIU Huabei. Study of interaction behavior between geogrids and sand with simple shear test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1):3722.
- [10] 陈成, 段永达, 芮瑞, 等. 基于拉拔试验和离散元模拟的单、双层土工格栅加固道砟的研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(4):954.
CHEN Cheng, DUAN Yongda, RUI Rui, et al. Study of single and two-layer geogrid reinforced bal lasted trackbed using pull-out test and discrete element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4):954.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工合成材料应用技术规范: JTG/T D32—2012 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. Ministry of Transport of the People's Republic of China.

- Technical specifications for application of geosynthetics in highway: JTG/T D32—2012 [S]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [12] 刘泽, 廖鹏, 何矾, 等. 加筋土挡墙筋材铺设参数优化研究 [J]. 工业建筑, 2021, 51(2): 135.
- LIU Ze, LIAO Peng, HE Fan, *et al.* Study on optimization of reinforcement laying parameters for reinforced soil retaining wall [J]. *Industrial Architecture*, 2021, 51(2): 135.
- [13] STAHL M, KONIETZKY H, TEKAMP L, *et al.* Discrete element simulation of geogrid-stabilised soil [J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(6): 1073.
- [14] WANG P, YIN Y, ZHOU W H, *et al.* Micro-mechanical analysis of soil-structure interface behavior under constant normal stiffness condition with DEM [J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17: 2711.
- [15] YANY J, ZHEN Y J. Soil-structure interface modeling with the nonlinear incremental approach [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2021, 45: 1381.
- [16] JING X J, ZHOU W H, ZHU H X, *et al.* Analysis of soil-structural interface behavior using three-dimensional DEM simulations [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2018, 42: 339.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] MIAO C X, ZHENG J J, ZHANG R J. DEM modeling of pullout behavior of geogrid reinforced ballast: the effect of particle shape [J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 81: 249.
- [20] ROTHENBURG L, BATHURST R J. Analytical study of induced anisotropy in idealized granular materials [J]. *Geotechnique*, 1989, 39(4): 601.
- [21] BATHURST R J, ROTHENBURG L. Observations on stress-force-fabric relationships in idealized granular materials [J]. *Mechanics of Materials*, 1990, 9(1): 65.