

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20200915001

格栅纵/横肋对筋-土界面拉拔特性的影响研究*

路遥, 肖成志, 罗亚楠, 王子寒

(河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘要: 为了研究格栅加筋土体复合材料的加筋机理, 借助砂土中双向格栅的拉拔试验, 综合研究了纵肋根数、纵肋长度、横肋数量和格栅裁剪方式等对筋-土界面作用特性和格栅横肋贡献率的影响。研究表明: 无横肋时筋材拔出对应的极限拉拔力随纵肋根数增加近似呈线性增加, 并随筋材单根纵肋长度的增加, 筋材极限拉拔力对应的加载端位移增大; 当筋材长度增加且大于临界长度时, 摩擦阻力增量斜率降低; 保持纵肋相同, 增加横肋数量筋材极限拉拔力增加, 且横肋端承阻力对拉拔力贡献率逐渐增加, 受横肋位置影响横肋对筋材拉拔力贡献率的增幅逐渐降低; 针对相同的50%横肋百分比, 筋材裁剪方式对筋-土界面摩擦作用效果显著, 格栅横、纵肋分布越均匀, 格栅极限拉拔力越大, 表明格栅网格均匀性是确保加筋效果的关键因素之一。

关键词: 拉拔试验; 土工格栅; 端承阻力; 拉拔力; 试验

中图分类号: TU432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-1069-07

Study of the Effect of Longitudinal and Transversal Ribs on Pullout Performance of Interface between Geogrids and Sand

LU Yao, XIAO Chengzhi, LUO Yanan, WANG Zihan

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In order to study soil reinforcement mechanism of geogrid-reinforced soil composite materials, the middle-scale pullout tests were carried out. The effects of the number of longitudinal and transversal ribs of geogrids, the length of ribs and cutting modes of geogrids on the interaction characteristics of reinforcement-soil interface were analyzed in detail. The pullout test results show that the ultimate pullout forces of geogrids increase with the increasing number of longitudinal ribs of geogrids without transversal ribs and the increasing length of single transversal rib of geogrids; the ultimate pullout forces and the corresponding displacements at the loading position increased simultaneously. Once the length of the single rib was greater than the given critical length, the increasement magnitude of frictional resistance reduced. Additionally, keeping the longitudinal ribs identical, to increase the number of transversal ribs, both the peak pullout forces of geogrid and the rate of bearing resistance of transversal rib increased; the increment magnitude of contribution rate of transversal ribs, however, reduced gradually. When the rate of transversal ribs is 50%, the cutting mode of geogrids has a great effect on the geogrid-soil interface performance. The more uniform the longitudinal and transversal

* 收稿日期: 2020-09-15; 修回日期: 2020-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877255, 52078182)、河北省自然科学基金项目(E2018202108) 资助

作者简介: 路遥(1997—), 男, 博士研究生。主要从事加筋土方面的研究。E-mail: 826727994@qq.com

通讯作者: 肖成志(1976—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事加筋土方面研究工作。E-mail: chengzhixiao@hotmail.com

ribs are, the greater the ultimate pullout forces of geogrid are, which indicates that the uniformity of grid size of geogrids is one of the key factors to ensure the reinforcing effect.

Keywords: pullout test; geogrids; bearing resistance; pullout force; test

引言

目前,土工格栅以优异的工程特性被广泛用于岩土加固工程领域,而筋-土界面特性及其筋土复合材料的加筋机理是设计的关键所在^[1]。现有筋-土界面作用特性试验以拉拔、直剪和扭剪试验为主。A.McGown等^[2]认为拉拔试验更能反映筋材在土体内的真实受力状况,且能自动反映密实土体的剪胀特性,因此,国内、外众多学者开展了大量的拉拔试验来研究筋-土界面间的相互作用特性^[3-6]。

N.Moraci等^[7]采用单向格栅开展拉拔试验,研究筋材长度和法向应力等对筋-土界面的影响。蔡春等^[8]分析了带加强肋格栅拉拔试验中极限拉拔阻力,研究表明加强肋前土体被挤密成楔体与筋材共同运动。李磊等^[9]通过拉拔试验研究加强肋厚度和横肋间距对拉拔力峰值的影响,结果表明法向应力较小时出现拉拔力峰值,法向应力较大时拉拔力随位移变化呈应变硬化趋势。进而,靳静等^[10]研究拉拔试验中横肋间距的影响,试验表明随着横肋间距逐渐减小,最大拉拔力及其相应的位移逐渐增大,黏聚力和摩擦角逐渐增大。

为了研究格栅纵/横肋对拉拔特性影响,徐超等^[11]研究了格栅网孔结构特征对筋-土界面作用的影响,指出拉拔位移较小时横肋端承阻力和纵肋摩阻力几乎同步增长,拉拔位移较大时且纵肋摩阻力达到峰值后,横肋端承阻力对拉拔力影响显著。王家全等^[12]开展了纵/横肋和法向应力影响的拉拔试验,结果表明随横肋减小,界面似摩擦系数和拉拔阻力也不断减小,并发现完整横肋有利于筋材更好地受力。王子鹏等^[13]进行单向和双向格栅的拉拔试验,分析了横肋在拉拔过程中对拉拔力的贡献作用。事实上,R.F.Wilson-Fahmy等^[14]基于试验指出格栅拉拔力由纵肋、横肋界面摩擦力与横肋端承阻力组成,随后D.T.Bergado等^[15]采用拉拔试验指出,纵肋摩擦作用力占总拉拔力的10%~15%,其余由横肋提供。

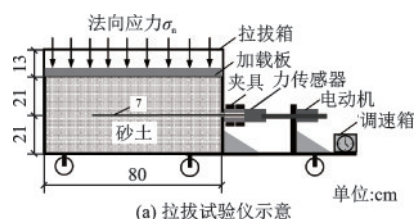
然而,目前对筋材横肋数量及其位置变化等

方面的研究相对较少。鉴于此,这里开展双向格栅与砂土拉拔试验,拟重点研究格栅纵肋长度与根数、横肋数量、横肋间距和横肋裁剪方式等因素对筋-土界面的摩阻力与端承阻力的影响,并分析纵、横肋加筋效应贡献率在整个拉拔过程的变化情况。

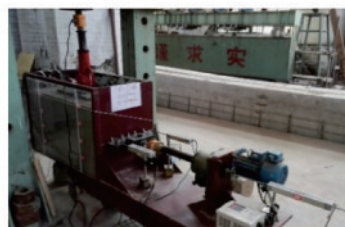
1 筋-土界面特性的拉拔试验介绍

1.1 拉拔试验仪

如图1所示,拉拔试验仪由试验箱、加载系统、筋材夹具和电机及调速箱等组成,试验箱长、宽和高分别为80、40、55 cm,并在加载端一侧钢板上预留高和宽分别为10 mm和340 mm的拉拔缝,用于筋材试样引出箱体与夹具相连。为减小内部摩擦,在箱体内侧衬贴厚为5 mm的钢化玻璃。试验中筋材承受水平拉拔力由电动机施加,并通过力传感器监测大小,筋材拉拔速度由调速箱控制;法向应力由反力架和千斤顶施加,以控制筋-土界面的正应力。



(a) 拉拔试验仪示意



(b) 拉拔仪

图1 模型试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the model test device

1.2 拉拔试验材料

筋材采用聚丙烯双向格栅,其极限抗拉强度为30 kN/m,网孔尺寸为4 cm×4 cm,格栅2%和5%

应变时对应的抗拉强度分别为 10.5、21 kN/m。

试验填土采用砂土,基于筛分试验得到砂土颗粒级配曲线如图 2 所示,砂土不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别为 2.65 和 0.99,砂土最大和最小干重度分别为 19.8、15.4 kN/m³,试验中砂土相对密实度 D_r 为 70%,砂土内摩擦角 $\varphi=35^\circ$ 。

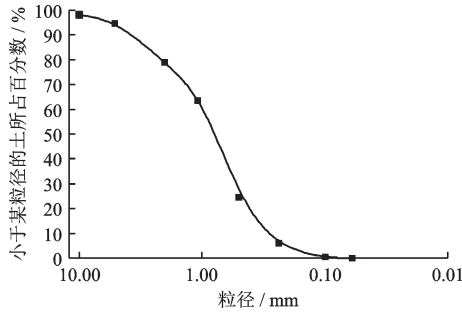


图 2 试验回填砂土颗粒级配曲线

Fig.2 Grain size distribution of the sand for filling

1.3 拉拔试验方案

这里格栅拉拔试验综合研究筋材纵肋数量、筋材长度、横肋数量和裁剪方式等因素对筋-土界面特性的影响,试验中选取筋材拉拔速率 $v=0.5$ mm/min 和法向应力 $\sigma_n=25$ kPa,筋材在夹具中宽度为 90 mm,长度为 290 mm,如图 3 所示,具体试验方案为:

(1)选取格栅埋设长度 $L=320$ mm 且无横肋情况,设置纵肋根数 $X=1、2、4、8$ 根,研究纵肋数量对筋-土界面特性的影响,如图 3(a)所示。

(2)选取单根纵肋筋材长度 L 分别为 80、120、160、200、240、280、320 mm,即依次增加一个格栅网孔长度,研究单根纵肋埋设长度变化对筋-土界面拉拔特性的影响,如图 3(b)所示。

(3)选取格栅埋设长度 L 为 320 mm 的两根纵肋,分别设置横肋数量 N 为 0、1、3、5、7,研究横肋对端承阻力分布规律的影响,如图 3(c)所示。

(4)选取格栅埋设长度 L 为 320 mm 的两根纵肋,设置单根横肋即 $N=1$,通过改变横肋位置分析其对筋-土界面拉拔特性的影响,如图 3(d)所示。

(5)针对长、宽分别为 320、290 mm 的筋材,拟通过保持相同的横肋百分比,即设置横肋百分比 $R=50\%$ (横肋数量占完整格栅横肋数的百分比),通过模拟横肋缺失情况下的隔一去一、横向单排去除、分段去除和纵向单排去除的裁剪形式,形成错位式、交替横裁式、半截式和交替纵裁式等四种形

式,如图 4 所示,由此研究格栅横肋分布形式对界面拉拔特性影响。

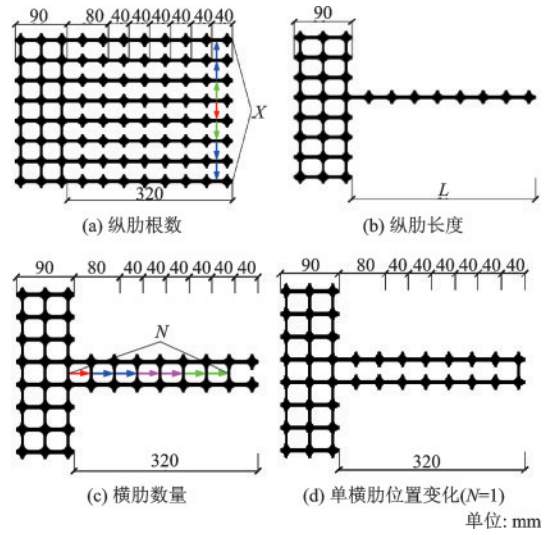


图 3 试验中筋材的变化设置

Fig.3 Variation of reinforcement for testing

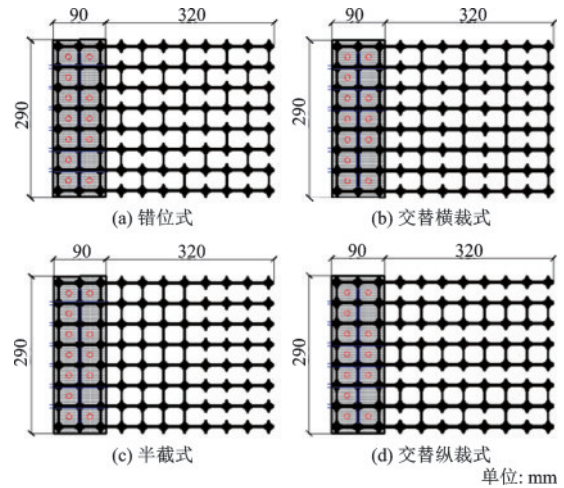


图 4 格栅裁剪方式

Fig.4 Cutting modes of geogrids

2 筋材拉拔试验结果分析

2.1 筋材纵肋根数 X 对拉拔特性的影响分析

针对埋设长度 $L=320$ mm 的无横肋筋材,选取拉拔速率 $v=0.5$ mm/min、界面正应力 $\sigma_n=25$ kPa 开展拉拔试验,研究纵肋根数 X 对筋-土界面相互作用特性的影响,图 5 为纵肋根数对筋材拉拔特性的影响。由图 5(a)可知,随着加载端拉拔力增加,加载端位移持续增加,初始阶段拉拔力与位移曲线较陡,拉拔力上升明显,位移增长缓慢,当达到

拉拔极限后,筋材持续拔出,拉拔力呈平稳减小趋势。随着纵肋根数 X 增加,相同拉拔位移时所需拉拔力增加,且极限荷载对应的加载端拉拔位移相应增加。

进一步地,图5(b)给出了纵肋根数与格栅极限拉拔力的相互关系,由图5(b)可知,在界面正应力 $\sigma_n=25$ kPa时,极限拉拔力随纵肋根数增加而呈近似线性增加,显然,当格栅横肋不存在时,总拉拔力即筋-土界面摩擦阻力极限值与纵肋根数呈正比。

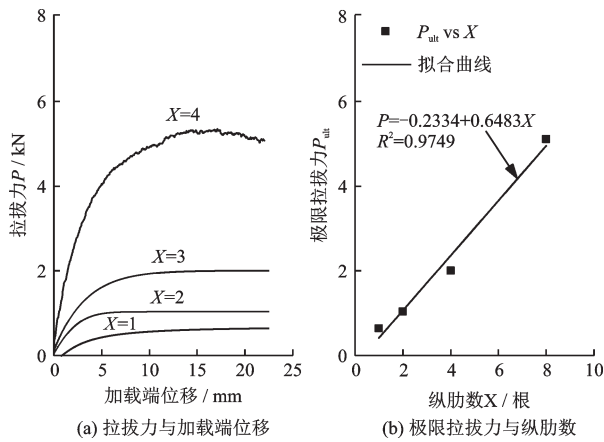


图5 纵肋根数对筋-土拉拔特性的影响
Fig.5 Effect of longitudinal ribs on pullout performance of geogrid-soil interface

2.2 筋材长度对拉拔特性的影响

选取拉拔速率 $v=0.5$ mm/min和 $\sigma_n=25$ kPa,针对单根纵肋格栅开展变化其长度对筋-土界面的拉拔特性的影响,结果如图6所示。由图6可知,随着加载端位移的增加,格栅拉拔力先急剧增加后趋于稳定,其中格栅埋设长度为80 mm时,因格栅被拉出长度占总长度的比例持续增加,筋-土接触面积显著减小,因此拉拔力呈先增加后减小的发展趋势。

此外,随着格栅长度增加,拉拔力峰值逐渐增加,且拉拔力峰值对应的加载端位移亦增大,表明增加格栅长度,加筋土复合材料可承受更大的水平剪切力和剪切变形,明显提高加筋土复合材料的加筋效果,这是由于格栅长度增长致使筋-土接触面积增大,筋-土之间相互作用加强,且筋材受力是由加载端向自由端逐渐传递的过程,格栅埋深越大,力向自由端传递的距离越远,加载端位移就越大。

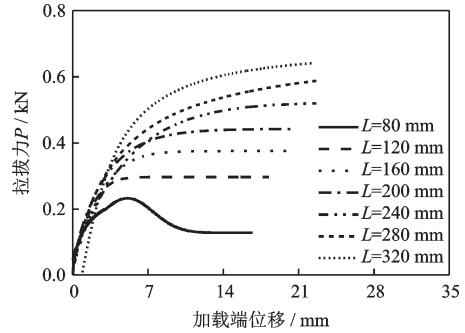


图6 拉拔力-加载端位移关系曲线
Fig.6 Pullout force versus displacement curves

进而,分析不同加载端位移时筋材拉拔力与单根纵肋长度的相互影响,如图7所示。由图7(a)可知,以加载端位移为5 mm时为例,当纵肋长度 $L \leq 200$ mm时筋材拉拔力随长度增加而增加;当 $L > 200$ mm后筋材拉拔力有下降趋势,拉拔力增量斜率降低,即拉拔力增量斜率随筋材长度增加先保持不变,而后出现下降,表明拉拔试验中拉拔力随纵肋长度的增加呈折线增加,即相同加载端位移下,筋材长度存在某临界长度,使得拉拔力增量斜率降低,此时继续增加筋材长度对拉拔力增加的作用不明显。此外,随着加载端位移增加,格栅临界长度逐渐增大,当格栅临界长度等于试样总长度时,筋材全长受力,表明拉拔试验中格栅受力沿纵向渐次传递。

另外,图7(b)给出了单根纵肋长度与筋材极限拉拔力的关系曲线,由图可知,当筋材以拔出破坏为主即筋材没有断裂时,单根纵肋极限拉拔力随筋材长度增加呈近似线性增加,表明不同长度格栅的拉拔力达到峰值时,格栅全长与砂土发生错动,即格栅被匀速拔出,此时拉拔力峰值为界面摩擦阻力,且与筋材埋设长度呈正比。

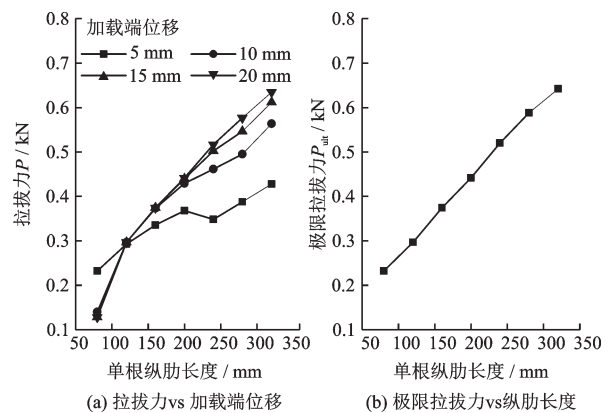


图7 不同拉拔位移下单根纵肋拉拔力关系曲线
Fig.7 Peak pull force versus length of longitudinal ribs curves for different pullout displacements

2.3 格栅横肋数量 N 的影响

如图 3(c) 所示, 针对格栅长度为 320 mm、纵肋数为 2 根的试样开展拉拔试验, 研究横肋数量 N 变化对筋-土界面的影响, 结果如图 8 所示。试验发现当横肋数量 $N > 5$ 时, 筋材加载端位移量在达到试验终止量之前被拉断, 当 $N \leq 5$ 时, 筋材加载端位移量在达到试验终止量而结束。显然, 由图 8 可知, 当横肋数 $N \leq 5$ 时, 随着横肋数量增加, 筋材极限拉拔力逐渐增加, 且增幅逐渐减小, 表明格栅极限拉拔力与横肋数量不存在线性关系, 即自由端的横肋比加载端处发挥的作用小, 主要由于格栅加载端相比于自由端产生了较大的格栅纵肋变形, 且格栅与砂土之间的相对位移也比较大, 导致加载端横肋发挥作用更大; 当横肋根数增至 7 时, 筋材最终的破坏状态为加载端格栅被拉断, 表明增加横肋数量有助于增强筋-土界面作用, 但筋材抗拉极限强度一定时, 横肋数量增至一定数量时, 即拉拔力达到筋材极限抗拉强度时, 继续增加横肋数量对加筋效果不明显。

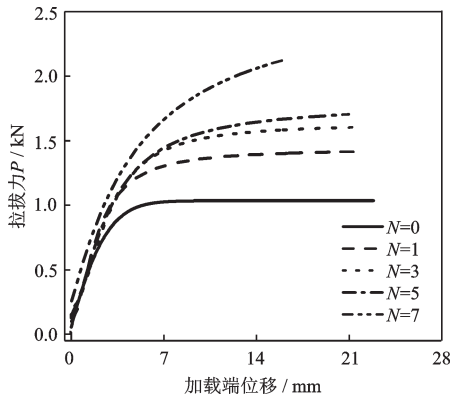


图 8 不同横肋数量下拉拔力-加载端位移关系曲线
Fig.8 Pullout force versus displacement curves for different transversal ribs

事实上, 无横肋即 $N=0$ 时拉拔力由筋材表面摩擦阻力提供, 随着横肋数量增加, 横肋端承阻力贡献逐步增加, 这里整理了不同横肋数时, 极限拉拔力时对应端承阻力峰值随横肋数量 N 的变化, 如图 9 所示。由图 9(b) 可知, 无横肋时拉拔初期摩擦阻力线性增加并很快达到峰值, 达到峰值时加载端位移约为 7 mm, 此时摩擦阻力峰值约为 1.035 kN, 逐步增加横肋数量后, 在拉拔极限状态下扣除摩擦阻力峰值, 可得图 9(a) 所示端承阻力峰值与横肋数量 N 的关系, 可知 $N=1, 3$ 和 5 时, 横肋端承阻力贡献率分别为 26.86%、35.49% 和 39.26%。明显地, 横肋逐

渐增加的过程中, 端承阻力对拉拔力的贡献率也在逐渐增加, 但贡献率增幅逐渐降低, 表明筋材自由端横肋承担的端承阻力小于加载端, 这与筋材本身的拉伸变形和筋-土之间的相对位移量密切相关。

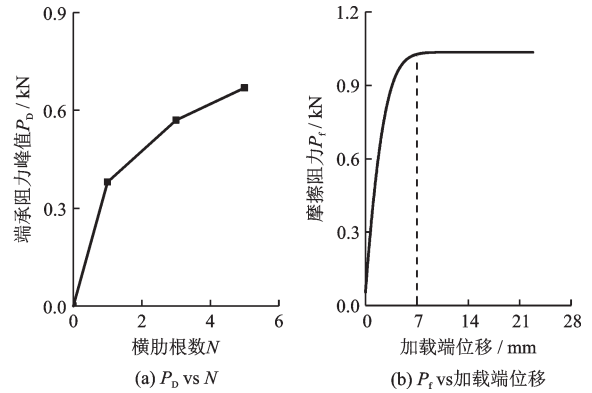


图 9 极限拉拔力中横肋端承阻力随横肋数量的变化
Fig.9 Resistance force of transversal ribs varied with the number of ribs under limit pullout conditions

进一步, 针对格栅长度 $L=320$ mm、纵肋根数为 2 和横肋根数为 1 时开展拉拔试验, 研究图 1(d) 所示横肋位置改变对筋-土界面摩擦作用特性的影响, 取单根横肋距加载端距离 $d=80$ mm 和 320 mm 时进行分析, 并选取无横肋情况进行对比分析, 结果如图 10 所示。由图可知, 加载拉拔初期, 加载端位移在 1 mm 内时, 主要以筋-土界面摩擦为主, 三种格栅形式的拉拔力基本上同步增长; 当加载端位移为 1~3.6 mm 时, 达到加载端位移相同时, 所需筋材拉拔力是横肋靠近加载端的筋材 ($d=80$ mm) 拉拔力最大, 此阶段由于筋-土相对位移较小, 横肋远离加载端的筋材 ($d=320$ mm) 拉拔力与无横肋格栅摩擦阻力相当, 该阶段靠近自由端的横肋对拉拔力的贡献较小; 当筋材加载端位移持续增加且大于 3.6 mm 后, 筋-土界面相对位移明显增加, 此时无横肋筋材很快达到界面摩擦峰值并趋于平稳, 而横肋位于 $d=320$ mm 处的筋材拉拔力上升明显, 并最终与 $d=80$ mm 时筋材拉拔力与位移曲线重合, 表明横肋位置不同时, 对筋材的受力过程影响较显著, 横肋离加载端越近, 初始加载端拉拔位移越小, 一旦筋-土界面达到摩擦峰值后, 横肋位置对拉拔后期拉拔力大小影响较小。因此, 实践工程中, 适当减小靠近潜在破坏面筋材的网孔尺寸, 即横肋更多靠近潜在破坏面时, 可增强加筋效果, 有效提高加筋土结构抗变形能力。

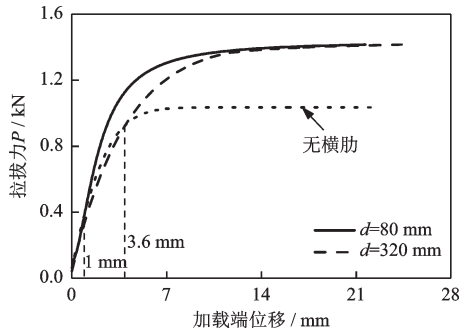


图10 拉拔力-加载端位移关系曲线

Fig.10 Pullout force versus pullout displacement curves

2.4 格栅裁剪方式的影响

针对筋材宽度 $W=290\text{ mm}$ 、长度 $L=320\text{ mm}$ 、拉拔速率 $v=0.5\text{ mm/min}$ 、界面正应力 $\sigma_n=25\text{ kPa}$ 和横肋百分比 $R=50\%$ ，采用图4所示格栅裁剪方式，分析裁剪方式即横肋分布模式对格栅拉拔力与加载端位移的影响，结果如图11所示。试验中裁剪方式为错位式时以格栅拉断破坏而终止，其他裁剪方式筋材拉拔终止条件为格栅拔出达到预设位移量。

由图可知，四种筋材试样拉拔试验初期，筋材拉拔力随加载端位移变化趋势一样，故加载初期拉拔力增加不受裁剪方式的影响，随着加载端拉拔位移的增加，裁剪方式对筋材拉拔力与位移曲线影响明显，错位式对应的拉拔力最大，交替横裁式和半截式曲线变化趋势类似，由此可知，格栅横肋分布越均匀，越有利于格栅受力，这是由于分布均匀的格栅横肋很大程度上保证了格栅的网格形状和格栅的均匀变形，进而增强了筋-土界面相互作用性能。

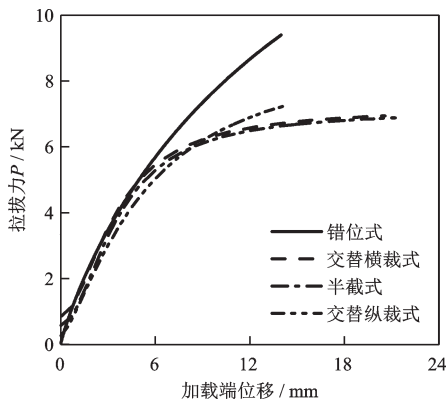


图11 裁剪方式对筋材拉拔力-加载端位移关系曲线影响

Fig.11 Effect of cutting modes on curves of pullout force and displacement for geogrids

进而，通过将不同裁剪方式格栅拉拔力峰值扣除无横肋格栅(图3(a))时的摩擦阻力峰值，忽略横肋本身摩擦阻力的影响，可得到不同裁剪方式时横肋端承阻力，见表1。由表1可知，交替纵裁式筋材拉拔力峰值略大于交替横裁式和半截式筋材，裁剪方式不同导致极限拉拔力增加主要源于端承阻力增加，故交替纵裁式有助于提高筋材加筋效果，原因是交替纵裁式格栅纵向保留了一列错位式裁剪格栅，加强了对填土的嵌锁作用。

表1 不同格栅裁剪方式时横肋端承阻力

Table 1 Bearing resistance of different cutting modes

裁剪方式	错位式	交替横裁式	半截式	交替纵裁式
端承阻力峰值/kN	4.31	1.66	1.63	1.85
端承阻力贡献率/%	44.62%	23.68	23.35	25.69

选取错位式筋材最终拉断状态分析，此时端承阻力及其贡献率分别约为 4.31 kN 和 44.62% 。综合分析四种裁剪方式发现，错位式筋材对应端承阻力和端承阻力贡献率最大，表明错位式加筋效果最好，这是由于错位式横肋交错分布，很好地限制了筋材的不均匀变形，使横肋更好地承担力的作用。

3 结 语

(1)无横肋时筋材拉拔力峰值由筋-土界面摩擦力提供，且当筋材拔出破坏时，无横肋筋材拉拔力峰值随纵肋数量增加而呈近似线性增加。

(2)单根纵肋筋材随埋设长度增加而拉拔力峰值增加，在相同拉拔端位移时，不同长度筋材埋设长度对应存在某一临界值，当实际埋设长度大于临界埋设长度时，拉拔力增量斜率会降低，体现格栅拉拔过程中受力的阶段性。

(3)随着横肋数量增加，筋材极限拉拔力增加，且横肋端承阻力对拉拔力贡献率逐渐增加，受横肋位置影响，筋材拉拔加载端横肋承担的端承阻力大于自由端，导致横肋数量增加时对筋材拉拔力贡献率的增幅逐渐降低。

(4)相同横肋百分比下，筋材裁剪方式对筋-土界面作用效果显著，错位式对应拉拔力达到筋材极限抗拉强度而发生破坏，表明格栅横、纵肋均匀分布所维持的网格结构是确保加筋效果的关键。

参考文献:

- [1] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册(第2版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
Compilation committee of manual for application of geosynthetics to engineering. Manual for application of geosynthetics to engineering(2nd Edition)[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000. (in Chinese)
- [2] McGown A, Andrawes K Z, Al-Hasani M M. Effect of inclusion properties on the behavior of sand [J]. Geotechnique, 1978, 28(3):327-346.
- [3] Zhang G, Liang D, Zhang J M. Image analysis measurement of soil particle movement during a soil-structure interface test [J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(4):248-259.
- [4] Ochiai H, Otani J, Hayashic S, et al. The pull-out resistance of geogrids in reinforced soil[J]. Geotextiles & Geomembranes, 1996, 14(1):19-42.
- [5] Sugimoto M, Alagiyawanna A M N. Pullout behavior of geogrid by test and numerical analysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(4):361-371.
- [6] 周健, 王家全, 孔祥利, 等. 砂土颗粒与土工合成材料接触界面细观研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 61-67.
Zhou J, Wang J Q, Kong X L, et al. Mesoscopic study of the interface between sandy soil and geosynthetics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1):61-67. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 蔡春, 张孟喜. 带加强肋土工格栅的极限拉拔阻力分析[J]. 岩土力学, 2011(增2):340-345.
Cai C, Zhang M X. Analysis of ultimate pullout resistance of geogrids with strengthening ribs [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011(Sup2):340-345. (in Chinese)
- [9] 李磊, 张孟喜, 周小凤, 等. 带加强节点双向土工格栅的拉拔试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(12):1494-1499.
Li L, Zhang M X, Zhou X F, et al. Pull-out tests of bi-axial geogrid with strengthening nodes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(12): 1494-1499. (in Chinese)
- [10] 靳静, 杨广庆, 刘伟超. 横肋间距对土工格栅拉拔特性影响试验研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(5): 1-8.
Jin J, Yang G Q, Liu W C. Experimental study on effect of transverse rib spacing on geogrid pull out characteristics[J]. China Railway Science, 2017, 38(5):1-8. (in Chinese)
- [11] 徐超, 廖星樾. 土工格栅与砂土相互作用机制的拉拔试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2):423-428.
Xu C, Liao X Y. Researches on interaction mechanism between geogrid and sand by pull-out tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 423-428. (in Chinese)
- [12] 王家全, 陆梦梁, 周岳富, 等. 土工格栅纵横肋的筋土承载特性分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 186-193.
Wang J Q, Lu M L, Zhou Y F, et al. Analysis on the bearing characteristics of reinforced soil in longitudinal and transverse ribs of geogrid [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 186-193. (in Chinese)
- [13] 王子鹏, 贾梓. 土工格栅横肋在加筋作用中贡献的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(3):84-86.
Wang Z P, Jia Z. Pull-out test on the contribution of geogrid ribsto reinforcement effect[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(3): 84-86. (in Chinese)
- [14] Wilson-Fahmy R F, Koerner R M, Sansone L J. Experimental behavior of polymeric geogrids in pullout [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(4): 661-677.
- [15] Bergado D T, Shivashankar R, Alfaro M C, et al. Interaction behaviour of steel grid reinforcements in a clayey sand[J]. Géotechnique, 1993, 43(4): 589 - 603.

(本文责编: 苏泽云)