

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.0787

土工格栅-碎石界面力学特性拉拔试验研究

闫穆涵^{1,2,3}, 凌贤长³, 唐 亮³, 肖 宏¹, 宋绪国²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308;
3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 土工格栅常用于复合地基的碎石垫层, 可有效限制其侧向位移并减小差异沉降, 这有赖于土工格栅与碎石颗粒间的相互作用。采用 3 种不同的级配碎石和双向、三向两种土工格栅进行了一系列大尺寸拉拔试验。试验结果表明, 更高的法向应力、更好的颗粒级配和更合理的碎石颗粒尺寸可以使拉拔阻力明显增加。冲剪破坏模型可以很好地解释双向格栅横肋在拉拔过程中与碎石层的剪切作用, 该模型也适用于三向格栅的斜肋, 只需合理计算斜肋的有效剪切长度。此外, 还提出了一种考虑网孔和碎石颗粒尺寸与颗粒嵌固作用的土工格栅峰值拉拔阻力的计算方法, 并给出了关键颗粒的概念用来评价格栅与碎石颗粒尺寸的匹配程度, 可以帮助设计者合理选择材料, 提高加固效果。

关 键 词: 双向格栅; 三向格栅; 碎石; 嵌固作用; 拉拔试验

中图分类号: U213.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 10-2967-12

Pull-out test study on mechanical characteristics of geogrid-aggregate interface

YAN Mu-han^{1,2,3}, LING Xian-zhang³, TANG Liang³, XIAO Hong¹, SONG Xu-guo²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China;
3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China)

Abstract: Geogrids are often used in the aggregate cushion of the composite foundation to limit the lateral displacement and reduce the differential deformation. It depends on the interaction between geogrids and aggregate particles. In this study, a series of large-size pull-out tests was performed on bi-axial and tri-axial geogrids embedded in aggregates with three particle-size gradations. The test results showed that higher normal stress, better gradation and more suitable aggregate particle sizes yielded the increase of the pull-out resistance. The classic punching-shear failure model was proven to be valid for explaining the shear effect between transverse ribs of bi-axial geogrids and the aggregate layer during the pull-out process. The bearing resistance of oblique ribs of tri-axial geogrids can also be calculated based on this theory, as long as the effective length of the oblique rib is calculated in a reasonable manner. Furthermore, an empirical method was proposed to calculate the peak pull-out resistance of the extruded geogrid embedded in the aggregate considering the sizes of apertures and aggregates, and interlock effect. The concept of key particles was proposed in this paper to measure how well the apertures of geogrids match the size of the particles. This may help designers choose the type of geogrids and improve the reinforcement effect.

Keywords: bi-axial geogrid; tri-axial geogrid; aggregate; interlock effect; pull-out test

1 引 言

土工格栅作为一种新型建筑材料, 因具有良好的工程性能被广泛应用于路基工程中。路基中铺设的土工格栅可以起到应力重分布、减小差异沉降、限制侧向变形、提高路堤整体稳定性等作用^[1]。此外, 土工格栅的应用还可以有效地降低道砟和碎石

垫层的厚度, 延长路基的使用寿命^[2-3]。

然而, 土工格栅的普及化程度与理论研究的深度并不匹配, 与传统建材相比, 其与土体相互作用机制并未有统一的认识。国内外学者经过多年研究, 主要形成 6 种理论: ①界面摩擦作用; ②约束增强作用; ③张力膜作用; ④加筋垫层的应力扩散作用; ⑤改变土体的应力状态和位移场; ⑥剪切带理论^[4]。

收稿日期: 2023-06-12

录用日期: 2023-07-24

基金项目: 中国铁路设计集团有限公司科技开发课题 (No.2022A02538015); 国家重点研发计划 (No.2016YFE0205100); 国家自然科学基金重点项目 (No.41731288)。

This work was supported by the Science and Technology Development Project of China Railway Design Corporation (2022A02538015), the National Key R&D Program of China (2016YFE0205100), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (41731288).

第一作者简介: 闫穆涵, 男, 1990 年生, 博士, 工程师, 主要从事地基加固和加筋技术等方面的研究。E-mail: ymh_hit@163.com

为深入研究筋土相互作用机制, 试验与理论研究不可或缺。无论参考何种理论, 在设计和分析土工加筋结构时, 都必须考虑筋土界面的抗剪强度, 这是被加固材料与土工格栅之间界面力学特性的一个重要参数^[5-6]。大尺寸拉拔试验是研究筋土界面基本力学性能的有效手段之一^[7-8], 其特点是可以测得一定埋深下土工格栅在土体中两面受力情况下的力与变形关系, 充分体现筋土间摩擦、嵌固和咬合作用, 尤其是可以直观地获得界面抗剪强度数据。

Sadat^[9]、陈榕^[10]等通过拉拔试验研究了不同填料、格栅类型和铺设方式对筋土界面力学特性的影响。然而, 颗粒嵌入对界面抗剪强度影响的研究还比较有限。土工格栅铺设在道砟层或碎石垫层时, 碎石颗粒会部分穿过格栅的网孔, 与格栅一起运动, 碎石颗粒与格栅的嵌固作用不可忽略^[11]。Kwon 等^[12]通过离散元分析发现, 由于嵌固作用, 碎石在土工格栅上下 10~15 cm 范围内形成了一个加固区, 该区域的大小与碎石颗粒的大小有关。Tutumluer 等^[2]通过数值模拟发现, 土工格栅网格的大小、形状以及碎石颗粒的形状、级配, 将影响颗粒的嵌入效果。Chen 等^[6]通过拉拔试验和离散元的方法研究了界面附近颗粒接触力的传递和剪切带的大小, 并指出颗粒嵌入可以明显提高加固效果。Sweta 等^[13-14]通过直剪试验研究了土工格栅和道砟-表层填料的界面特性, 通过颗粒平均尺寸和网孔尺寸的比值评价加固效果, 但该研究更关注颗粒破碎。

双向格栅在土中受到不同方向的拉力作用时, 其界面抗剪强度也不相同^[15-16]。一般地, 在铁路路基工程中, 土工格栅水平铺设, 随着列车的运营和基层的差异沉降, 土工格栅可能会受到不同方向上的拉力。Giroud^[17]研究发现, 三向土工格栅可比双向土工格栅提供更高的界面抗剪强度, 更小的各向异性, 能够将土的应力更合理地转移到土工格栅的肋条上, 并且更有利于颗粒的嵌入。也有研究证明, 三向土工格栅由于其独特的三角形网孔形状, 与双向土工格栅相比具有更稳定的结构, 可以更有效地降低沉降、约束侧向变形和提高土体强度^[18-20]。

综上所述, 以往研究侧重于定性分析不同类型格栅与土体之间的界面力学特性, 为加筋工程提出了诸多合理化建议。但是, 探讨定量计算方法的研究较少, 尤其是能够考虑三向格栅与碎石颗粒嵌固作用的。本文对两种类型的土工格栅和 3 种级配的碎石进行了共 60 次大尺寸拉拔试验, 提出基于考虑颗粒嵌固影响的冲剪破坏理论计算拉拔阻力的方法。此外, 本文还提出了关键颗粒的概念, 用于量

化碎石颗粒嵌入格栅网孔带来的影响。

2 试验设计

2.1 试验仪器

试验采用哈尔滨工业大学土木学院的大尺寸筋土拉拔试验仪进行, 如图 1 所示。该仪器为自主研发, 试验箱尺寸为 800 mm×600 mm×600 mm (长×宽×高), 前后挡板中间各开一宽 400 mm、高 8 mm 的引出缝, 格栅试件距试验箱上、下两面 300 mm, 距左、右两侧 100 mm, 以减小边界效应的影响。竖向荷载最大可施加 150 kN, 工作行程为 150 mm。位移传感器采用京海泉 GA-50 型 LVDT 传感器, 量程为±50 mm, 线性度为±0.5% FS。测试数据通过 Agilent 34970A 数采仪进行采集并通过配套软件实时监测。



图 1 大尺寸拉拔试验仪

Fig.1 Large-scale pull-out test apparatus

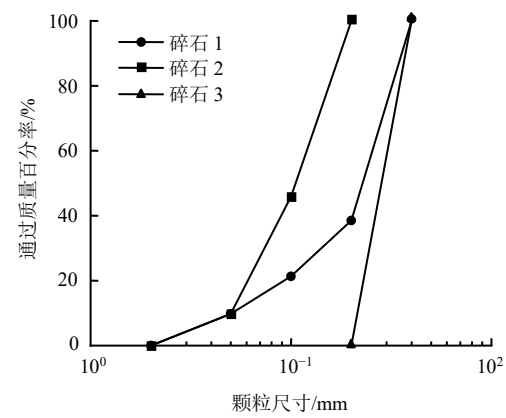
2.2 试验材料

2.2.1 碎石填料

拉拔试验采用的碎石为哈尔滨市阿城区开山石, 颗粒有明显棱角, 无裂痕, 表面无泥土附着, 无黏性, 最大颗粒不超过 40 mm, 最小颗粒不小于 2 mm, 不同颗粒岩性一致, 原始颗粒级配的碎石试样简称为碎石 1, 原始颗粒级配通过圆孔筛分试验获得。

为研究颗粒尺寸对筋土界面的影响, 本文将碎石 1 中直径 20~40 mm 的颗粒筛去, 只研究 20 mm 以下粒径对界面力学特性的影响。依据《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2010)^[21], 当试样中含有超过试样允许的最大粒径时, 可采用等量替代法处理, 等量替代后的试样简称为碎石 2。该组试验结果可以与碎石 1 结果对比验证, 研究在级配相似只有大颗粒含量不同的情况下界面力学特性的差别。最后选择一种只含有直径 20~40 mm 颗粒的级

配，研究大颗粒对界面力学特性的影响，简称为碎石 3。3 种碎石的级配曲线和典型颗粒组成如图 2 所示。



(a) 颗粒级配曲线



(b) 典型颗粒组成

图 2 碎石填料级配曲线与典型颗粒组成
Fig.2 Gradation curve and composition of typical particles of aggregate filler

通过大型三轴试验和击实试验测试碎石内摩擦角和最大干密度如表 1 所示，其黏聚力可忽略不计。

表 1 级配碎石物理力学指标				
Table 1 Physical and mechanical indexes of aggregates				
材料参数	C_u	C_c	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	最大干密度 $\rho_{\max}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
碎石 1	5.40	1.67	43.69	1.78
碎石 2	2.50	1.02	40.77	1.56
碎石 3	1.45	0.96	42.47	1.63

2.2.2 土工格栅

目前，国内双向土工格栅在各类工程中应用较为广泛，三向格栅由于出现时间较晚，在国内尚无大规模应用。三向土工格栅的网孔结构更合理，与被加固土体接触更紧密，因而具有优良的工程性能。本文试验选用双向格栅和三向格栅两种加筋材料，

探究其加固机制，两种格栅单元结构示意图见图 3，具体尺寸参数见表 2 和表 3， S 为网孔边长， W_R 为肋条宽度， W_J 为节点宽度， H 为肋条的厚度。

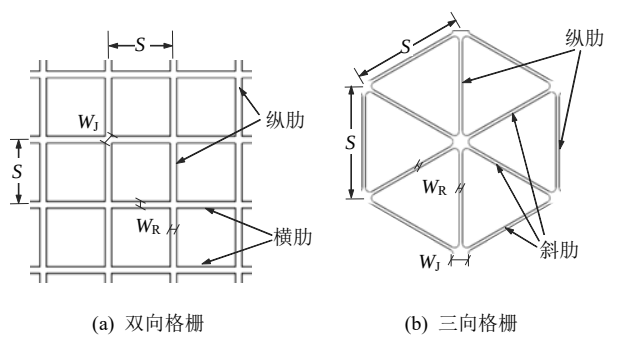


图 3 土工格栅单元结构示意图
Fig.3 Diagram of geogrid unit structure

表 2 双向格栅尺寸表			
Table 2 Geometric dimensions of bi-axial geogrids			
S/mm	W_R/mm	W_J/mm	H/mm
40	3	4.2	2

表 3 三向格栅尺寸表					
Table 3 Geometric dimensions of tri-axial geogrids					
S/mm	W_R/mm		W_J/mm	H/mm	
	纵肋	斜肋		纵肋	斜肋
40	1.4	1.2	6	1.3	1.6

三向格栅的展开方向定义为 0° 方向，垂直于展开方向为 90° 方向，所对应的两种三向格栅试件称为 TX-0 和 TX-90， 30° 和 60° 两个方向受力特点与 0° 和 90° 方向大体相似。双向格栅试件称为 Bi，由于受力方向与肋条方向垂直时加筋效果最佳，工程中一般沿着结构物主要受力方向展开和铺设格栅，又因其具有正方形网孔结构，试件 0° 与 90° 方向性质相同，无需重复研究。为分别研究横肋和纵肋（斜肋）对筋土界面的影响，本文采用剃肋的方式对其进行解耦，即剔除掉三向和双向格栅中的斜肋和横肋，只留纵肋进行拉拔试验，据此制作了试件 TX-LR 和 Bi-LR，如图 4 所示。根据中国铁路总公司企业标准《铁路工程土工合成材料 第 2 部分：土工格栅》（Q/CR 549.2—2016）^[22] 相关试验规程，测得试验所用土工格栅伸长率 5% 时的割线拉伸模量如下：双向格栅为 502.9 kN/m，三向格栅 0° 方向为 261.9 kN/m、 90° 方向为 352.8 kN/m。

2.3 试验工况

试验研究在哈尔滨工业大学完成，包括完整的双向格栅和三向格栅以及剔除横肋和斜肋后的双向格栅和三向格栅， 0° 和 90° 两个拉拔方向，3 种不同

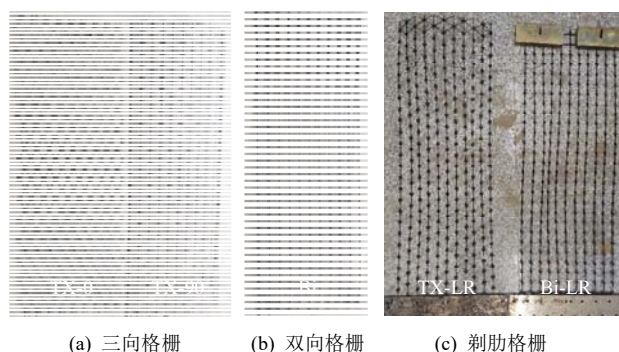


图4 土工格栅试件
Fig.4 Geogrid specimens

的碎石级配以及 4 种不同的竖向荷载下的筋土相互作用。竖向荷载的设计是基于预试验的结果确定的，在预试验中，试件临界竖向荷载约为 8.0 kPa，超过这一压力格栅会在拉出之前发生断裂。为保证正式试验中能够测得完整的拉拔曲线和最大界面强度，最大竖向应力设为 7.5 kPa，具体工况见表 4 和表 5。格栅拉拔速率为 1 mm/min，试验终止条件为格栅被拉断或轴向位移达到 50 mm^[23]。

表4 完整土工格栅—碎石试件工况表
Table 4 Summary of intact geogrid-aggregate testing schemes

试样编号	格栅类型	拉拔方向/(°)	碎石类型	竖向应力 q/kPa
EGG 1~4	双向格栅	—	1	0.0, 2.5, 5.0, 7.5
EGG 5~8	双向格栅	—	2	0.0, 2.5, 5.0, 7.5
EGG 9~12	双向格栅	—	3	0.0, 2.5, 5.0, 7.5
EGG 13~16	三向格栅	0	1	0.0, 2.5, 5.0, 7.5
EGG 17~20	三向格栅	0	2	0.0, 2.5, 5.0, 7.5
EGG 21~24	三向格栅	0	3	0.0, 2.5, 5.0, 7.5
EGG 25~28	三向格栅	90	1	0.0, 2.5, 5.0, 7.5
EGG 29~32	三向格栅	90	2	0.0, 2.5, 5.0, 7.5
EGG 33~36	三向格栅	90	3	0.0, 2.5, 5.0, 7.5

表5 剃肋土工格栅—碎石试件工况表
Table 5 Summary of rib-reduced geogrid-aggregate testing schemes

试样编号	格栅类型	碎石类型	竖向应力 q/kPa
LRG 1~4	双向格栅	1	0.0, 2.5, 5.0, 7.5
LRG 5~8	双向格栅	2	0.0, 2.5, 5.0, 7.5
LRG 9~12	双向格栅	3	0.0, 2.5, 5.0, 7.5
LRG 13~16	三向格栅	1	0.0, 2.5, 5.0, 7.5
LRG 17~20	三向格栅	2	0.0, 2.5, 5.0, 7.5
LRG 21~24	三向格栅	3	0.0, 2.5, 5.0, 7.5

3 试验结果与分析

完整格栅与碎石拉拔试验结果如图 5 所示。由图可知，在拉拔位移较小时拉拔力增加速度较快，随着位移的增加，拉拔力的变化趋于平缓并最终达

到峰值。对于竖向应力较小的工况，拉拔力达到峰值后可能会发生一定的下降，这是由于该工况拉拔力总体较小，一旦嵌固在格栅网孔中的大颗粒随着相对位移离开格栅平面，其对于拉拔力的影响较为显著。而对于竖向应力较大的工况，个别颗粒的嵌固与否对总拉拔力影响不明显，其拉拔曲线最后皆趋于稳定。

图 6 为三向格栅峰值拉拔力与竖向荷载关系曲线。图 7 为双向格栅峰值拉拔力与竖向荷载关系曲线。结合图 5 可知，无论是 TX-0、TX-90 还是 Bi，在相同颗粒级配下，峰值拉拔力皆随竖向荷载的增加而增大。相同竖向荷载下，级配 1 的拉拔阻力最大而级配 2 的最小，这是由于级配 1 既有较大的碎石颗粒又有较为合理的级配。而只含有大颗粒的级配 3 的工况拉拔力仍普遍大于级配更合理但没有大颗粒的级配 2 的工况，这说明大颗粒含量比颗粒级配的合理性对拉拔阻力有更大的影响。

剃肋格栅与碎石的拉拔试验结果如图 8 所示。由图可知，剃肋格栅拉拔阻力变化规律与完整格栅基本一致，拉拔阻力随竖向荷载的增大而增大。但由于碎石工况下曲线波动较大，无法准确判断到达峰值拉拔阻力的轴向位移，这同样是受到了个别大颗粒的行为和碎石试验离散性的影响。

剃肋格栅峰值拉拔力如图 9 所示，峰值拉拔力与竖向荷载之间大体呈线性关系，可见格栅纵肋与碎石之间的作用符合库仑摩擦定律，这为计算拉拔阻力的不同组成提供了依据。同时可以观察到，在不同碎石试样中斜率变化并不明显，这可能是由于虽然碎石试样级配不同，但由于采用的同一批石料，其与格栅接触的颗粒表面的性质是一致的，级配的影响并没有引起质变。

4 最大拉拔力计算理论

埋设在土工构筑物中的格栅受到拉力而与周围土体产生相对位移时，土工格栅受到的阻力主要由两部分作用组成：①土工格栅表面与土体的摩擦阻力；②土工格栅斜肋/横肋与土体相对位移时产生的端承阻力，如图 10 所示。

土工格栅的拉拔阻力可表示为^[24]

$$F = F_s + F_b \quad (1)$$

式中： F 为土工格栅总拉拔阻力 (kN)； F_s 为土工格栅表面的界面摩擦阻力 (kN)； F_b 为土工格栅斜肋/横肋的端承阻力 (kN)。

界面摩擦阻力的具体表达式为

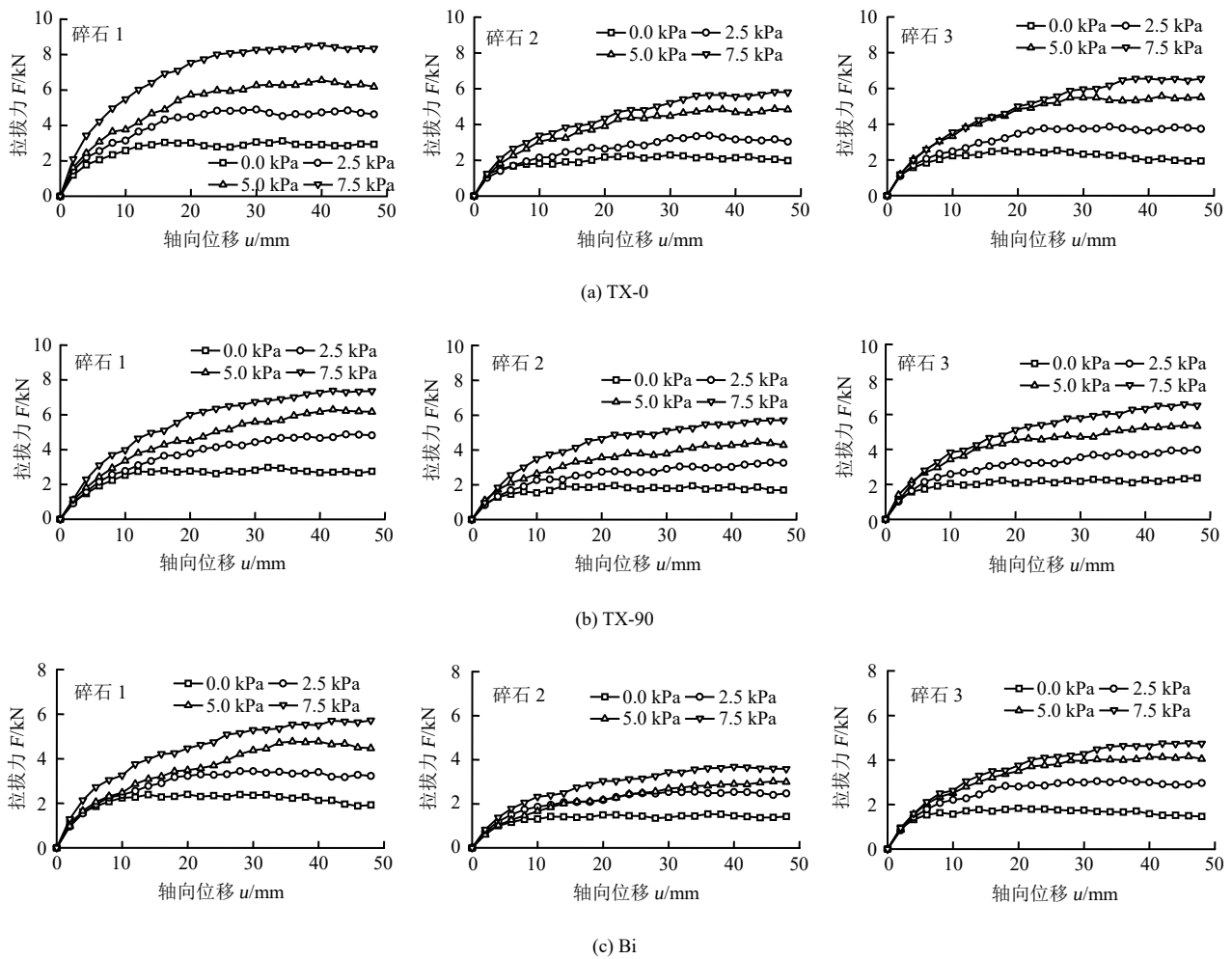


图 5 土工格栅与碎石拉拔曲线
Fig.5 Pull-out curves of geogrids and aggregates

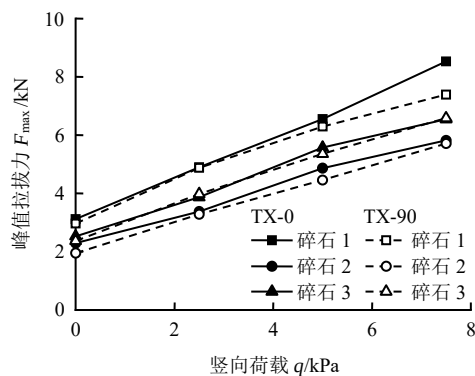


图 6 三向格栅峰值拉力与竖向荷载曲线
Fig.6 Relationship between peak pull-out force and vertical load for tri-axial geogrids

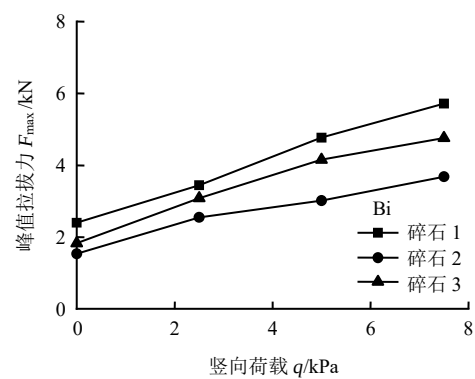


图 7 双向格栅峰值拉力与竖向荷载曲线
Fig.7 Relationship between peak pull-out force and vertical load for bi-axial geogrids

$$F_s = A_s \sigma_n \tan \delta \quad (2)$$

式中： A_s 为土工格栅上下表面的面积 (m^2)； σ_n 为土工格栅受到的竖向应力 (kPa)； δ 为筋材与土界面的摩擦角。

$$\sigma_n = q + \gamma h \quad (3)$$

式中： q 为土体表面的外荷载 (kPa)； γh 为格栅上方土体的自重 (kPa)。

目前被广泛采纳的计算格栅横肋端承阻力的方法为

$$F_b = A_b (cN_c + \sigma_n N_q) \quad (4)$$

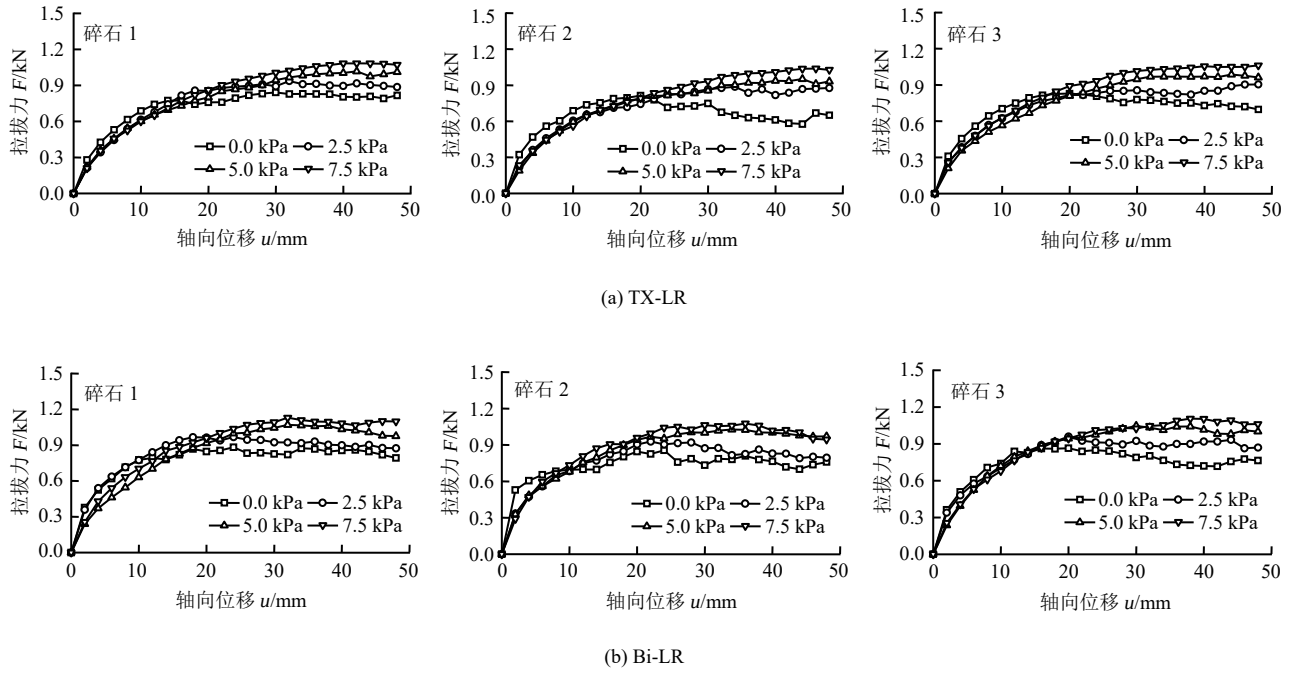


图 8 剃肋格栅拉拔试验曲线
Fig.8 Pull-out curves of rib-reduced geogrids

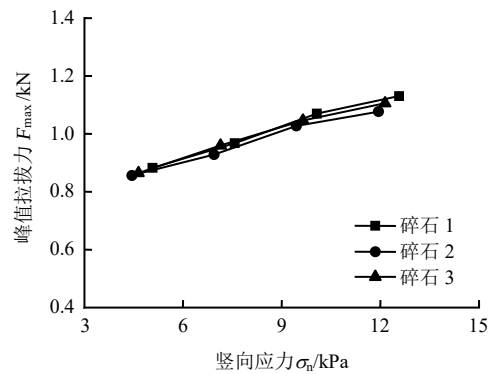
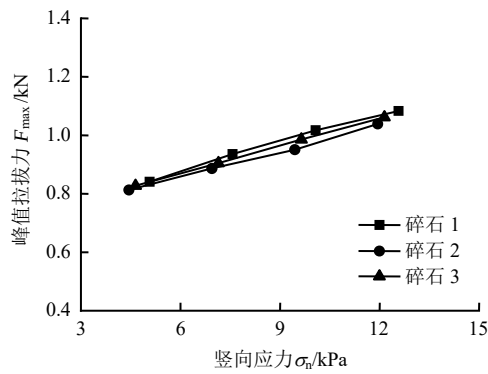


图 9 剃肋格栅峰值拉拔力与竖向应力曲线

Fig.9 Relationship between peak pull-out force and vertical stress of rib-reduced geogrids

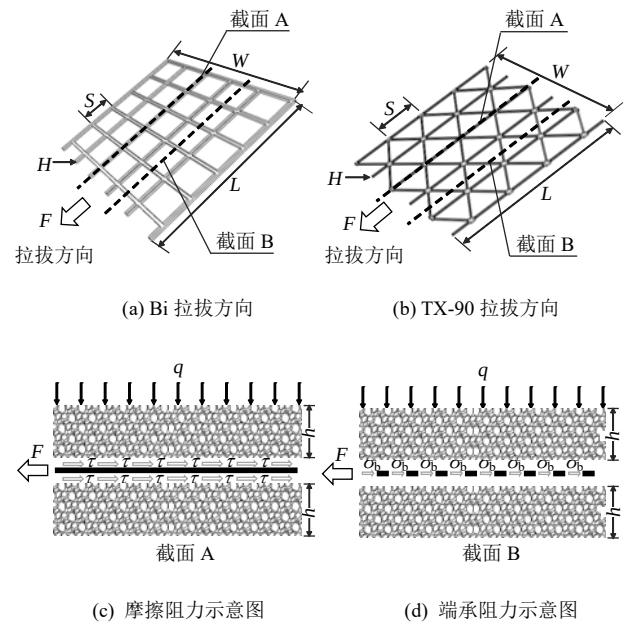


图 10 土工格栅-碎石界面受力示意图

Fig.10 Sketch of interfacial mechanism between geogrids and aggregates

式中: N_c 、 N_q 为端承阻力影响系数; A_b 为土工格栅端承面积 (m^2); c 为土体黏聚力 (kPa); σ_n 为格栅受到的竖向应力 (kPa)。

式 (4) 是基于地基承载力计算的 Prandtl 解提出的, 适用于双向格栅与细粒填料。

$$N_c = \cot \varphi (N_q - 1) \quad (5)$$

式中： φ 为土体内摩擦角。

N_q 的计算方法取决于被格栅横肋剪切土体的破坏模式，主要有整体剪切破坏^[25]和冲剪破坏^[26]两种，由于试验选用的碎石属于无黏性材料，其破坏形式应更接近于冲剪破坏。

整体剪切破坏：

$$N_q = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \exp(\pi \tan \varphi) \quad (6)$$

冲剪破坏：

$$N_q = \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \exp\left[\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) \tan \varphi\right] \quad (7)$$

三向格栅斜肋所产生的端承阻力比较复杂，本文沿用现有双向格栅计算方法，通过修正使之适用于三向格栅。假定斜肋的有效剪切长度为斜肋在垂直于拉拔方向上的投影长度，具体计算方法如图 11 所示。

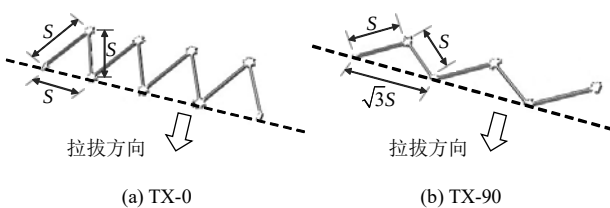


图 11 三向格栅斜肋有效剪切长度

Fig.11 Effective shear length of the oblique ribs of tri-axial geogrids

计算格栅摩擦面积时用整个格栅试件埋置在填料中的面积减去对应网孔的面积再乘以 2，网孔的面积取 10 个不同位置处网孔面积的平均值。双向格栅横肋剪切面积为单个横肋的长度与厚度的乘积再乘以参与土体剪切的横肋的数量，三向格栅斜肋剪切面积的计算时将横肋的长度替换为斜肋有效剪切长度即可。各类格栅试件摩擦面积与剪切面积如表 6 所示。

表 6 土工格栅计算参数

Table 6 Calculation parameters of geogrids

试样型号	A_s/m^2	A_b/m^2
TX-LR	0.024 64	—
TX-0	0.062 93	0.024 01
TX-90	0.063 04	0.022 17
Bi-LR	0.052 80	—
Bi	0.097 20	0.016 00

5 考虑嵌固作用的拉拔阻力计算方法

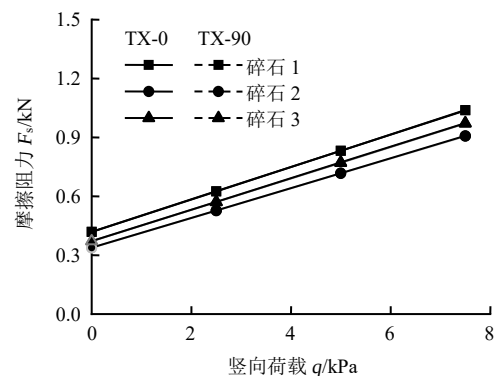
根据拉拔阻力的组成，分别计算摩擦阻力与端

承阻力。由图 9 可知，格栅表面与碎石之间存在摩擦阻力，峰值拉拔力与竖向应力可用线性拟合，设其斜率为 ξ 。剃肋三向格栅在碎石 1、2、3 中 ξ 的取值分别为 0.032 3、0.029 7 和 0.031 3；剃肋双向格栅在碎石 1、2、3 中 ξ 的取值分别为 0.033 8、0.030 2 和 0.032 5。

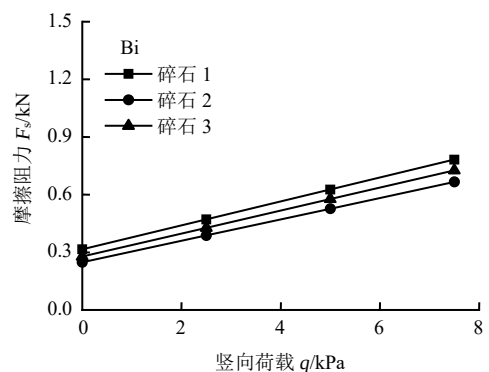
根据经典摩擦理论，材料之间的摩擦力主要由材料属性、接触面积和法向应力决定，以双向格栅为例，可以通过式 (8) 由剃肋格栅试验结果推算完整格栅拉拔作用下纯摩擦产生的阻力，计算结果如图 12 所示。

$$F_{s,Bi} = \xi \sigma_n A_{s,Bi} / A_{s,Bi-LR} \quad (8)$$

式中： $F_{s,Bi}$ 为完整双向格栅的摩擦阻力； $A_{s,Bi}$ 为完整双向格栅的表面积； $A_{s,Bi-LR}$ 为剃肋双向格栅的表面积。



(a) 三向土工格栅



(b) 双向土工格栅

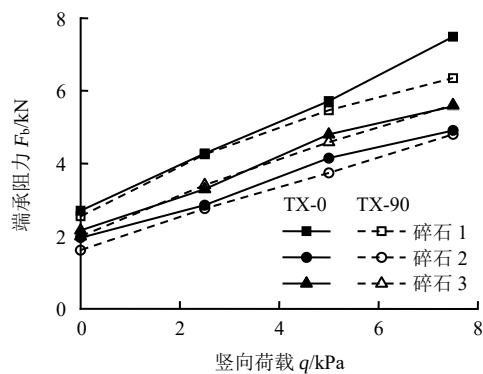
图 12 土工格栅与碎石摩擦阻力曲线

Fig.12 Frictional resistance curves of geogrids and aggregates

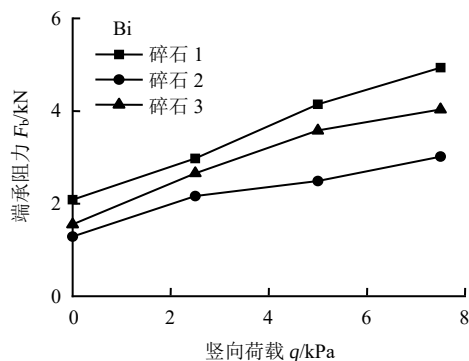
总体而言，摩擦阻力随竖向应力的增加而增大，在碎石 1 中摩擦阻力最大，碎石 3 中次之，在碎石 2 中最小，这是由于碎石 1 具有更合理的级配，密实程度更高，碎石颗粒与格栅接触更为紧密。两种拉拔方向下三向格栅的摩擦阻力基本一致，这同

样是由于 TX-0 与 TX-90 两种工况只有拉拔方向不一致, 格栅表面与填料接触的面积相差不大, 摩擦系数也一样。

通过图 6、7、12 和式 (1) 可以求得各工况端阻力 F_b 的大小, 如图 13 所示。将碎石参数代入式 (7) 和式 (4), 可得传统冲剪破坏模式下斜肋承担的端承阻力。图 14 为不同级配下端承阻力试验值与理论值的对比。由于按整体破坏模式计算的结果与实测值相差过大, 在此不予以展示。这是由于碎石是松散颗粒材料, 填料本身不具有黏聚力, 故而更倾向于局部破坏。由图可知, 碎石 1 工况下的端承阻力最大而碎石 2 工况下的最小。端承阻力随竖向应力的增大而增长, 其变化规律接近线性, 但实测值曲线的斜率略大于冲剪破坏理论值曲线斜率, 这可能是由于碎石颗粒嵌固的影响。与细颗粒填料中的拉拔阻力产生机制不同, 由于细颗粒填料颗粒尺寸远小于格栅网孔尺寸, 可以沿用传统土力学中浅基础的破坏模式, 而碎石的颗粒大小与土工格栅网孔相近, 容易嵌入网孔中, 使得格栅拉拔阻力大幅提升。因此, 本文尝试引入一个参数用以评价嵌固作用对拉拔阻力的影响。试验中实际观察到碎石嵌入格栅中的情况如图 15 所示。



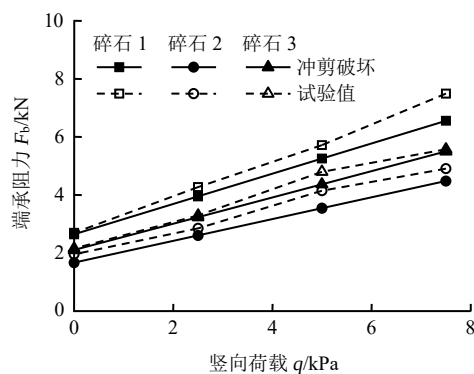
(a) 三向土工格栅



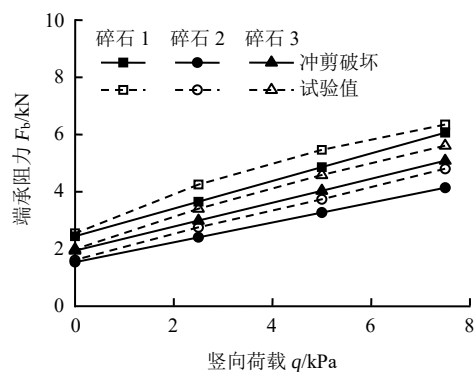
(b) 双向土工格栅

图 13 土工格栅与碎石端承阻力曲线

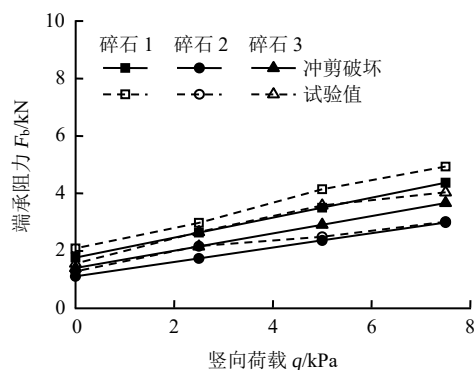
Fig.13 Bearing resistance curves of geogrids and aggregates



(a) TX-0



(b) TX-90



(c) Bi

图 14 端承阻力试验值与理论值对比

Fig.14 Comparison between experimental and theoretical values of bearing resistance

由图可知, 碎石的嵌固分两种情况, 其一为单颗粒嵌固, 其二为多颗粒嵌固。为简化归纳各种嵌固形式, 本文进行了如下假定:

(1) 粒径是衡量岩土颗粒尺寸的重要指标, 可以理解为岩土颗粒刚好能够通过土筛圆孔的直径。类似地, 在研究格栅平面颗粒嵌固问题时, 本文将嵌入格栅网孔的颗粒等效为粒径为 d 的圆。

(2) 在试验中嵌入格栅网孔中的碎石颗粒尺寸并不相同, 但多颗粒稳定嵌固一般形式为若干小颗粒填充进大颗粒与肋条间的空隙, 本文假定能否稳

定的嵌固取决于其中最大的那个颗粒, 后文称之为关键颗粒。

(3) 假定网孔内每个颗粒必须有 3 个点与相邻肋条或其他颗粒接触, 才能达到稳定状态, 后文称之为稳定嵌固, 在这种状态下, 网孔中的颗粒会随着格栅一起移动, 增大了格栅界面与碎石层的接触面积和粗糙程度, 从而提高了格栅与碎石间的拉拔阻力。几种常见的双向和三向格栅稳定嵌固模式分别如图 16(a) 和 16(b) 所示, 图 16(c) 列举了几种不稳定嵌固的情况。

(4) 为了方便统计和量化颗粒嵌固的情况, 图中展示的多颗粒稳定嵌固是各粒径相同的特殊情况, 这种情况下粒径的大小可以认为是多颗粒嵌固关键颗粒粒径的下限, 即只要关键颗粒粒径大于这个数值, 并小于单颗粒稳定嵌固的数值, 就能参与稳定嵌固。



(a) 三向格栅



(b) 双向格栅

图 15 碎石嵌固典型示例

Fig.15 Typical examples of aggregate interlock

由图 16 的各种嵌固形式可以算出各工况下关键颗粒的临界尺寸, 通过对照图 2(a) 的颗粒级配曲线可求得关键颗粒占全部颗粒的质量百分比 α 。由于碎石填料无黏性, 所以在计算端承阻力时, 与黏

聚力相关的项可忽略不计。苗晨曦^[27]、郑俊杰^[28]、王家全^[29]等通过研究发现, 嵌入网孔中颗粒的数量与拉拔阻力的大小直接相关, 但并未给出具体的计算公式。本文提出了与关键颗粒质量百分比相关的修正内摩擦角 φ' , 计算考虑颗粒嵌固作用的端承阻力。

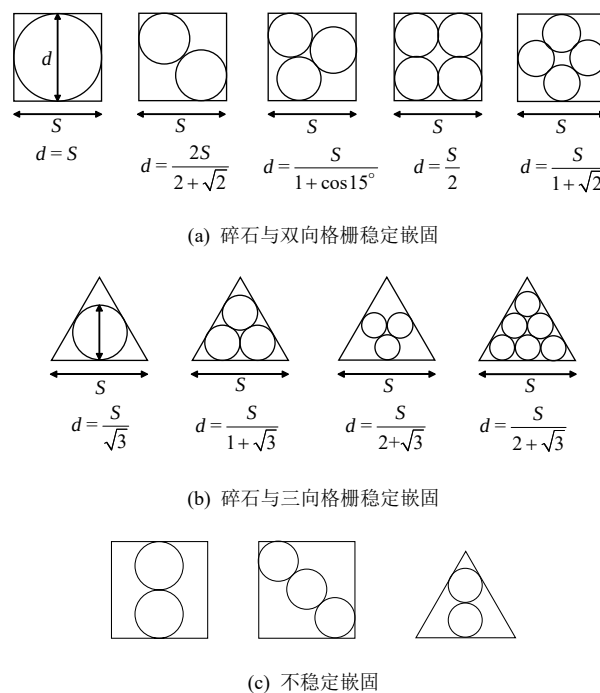


图 16 碎石颗粒嵌固示意图

Fig.16 Diagram of aggregate particles embedded in geogrids

$$\varphi' = \varphi + \varphi(\alpha) \quad (9)$$

式中: $\varphi(\alpha)$ 为嵌固角, 为与 α 相关的函数。

相应地, 式 (7) 可改写为

$$N_q' = \tan(\pi/4 + \varphi'/2) \exp[(\pi/2 + \varphi') \tan \varphi'] \quad (10)$$

根据图 13 中实测的端承阻力和表 6 的土工格栅计算参数, 通过式 (4) 和式 (10) 可以反推修正内摩擦角 φ' 。 φ' 的解析解较难求, 可通过编程的方式在原始内摩擦角附近范围进行试算, 当计算端承阻力与实测值的误差在合理范围内 (如 0.1 kN) 时停止计算, 即可得到该工况下 φ' 的取值范围。通过计算格栅与碎石相同而竖向荷载不同的 4 个工况下 φ' 的交集, 即可获得 φ' 的最终取值, 进而通过式 (9) 求得嵌固角 $\varphi(\alpha)$ 。计算结果如表 7 所示, 修正后端承阻力的计算值与试验值的对比如图 17 所示。

由图可知, 对于三向和双向格栅的各种工况, 端承阻力的计算值与试验值都较为接近。

表 7 修正内摩擦角计算参数
Table 7 Calculation parameters of modified internal friction angles

格栅类型	碎石级配	关键颗粒直径 d/mm	关键颗粒质量百分比 $\alpha/\%$	嵌固角 $\varphi(\alpha)/(^{\circ})$	修正内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$
三向格栅	1	10.7	25.0	0.832	44.522
	2	~	50.0	1.059	41.829
	3	23.0	15.0	0.647	43.117
双向格栅	1	16.6	67.5	1.139	44.829
	2	~	18.0	0.713	41.483
	3	40.0	100.0	1.226	43.696

设修正与未修正的碎石填料内摩擦角正切值的比值为 β :

$$\beta = \tan \varphi' / \tan \varphi \quad (11)$$

修正系数 β 与关键颗粒质量百分比 α 的拟合关系式为式 (12), 拟合函数曲线如图 18 所示。

$$\beta = -0.043 \times 0.953^{\alpha} + 1.043 \quad (12)$$

修正系数 β 随 α 的提高而增大, 在 α 为 100 时

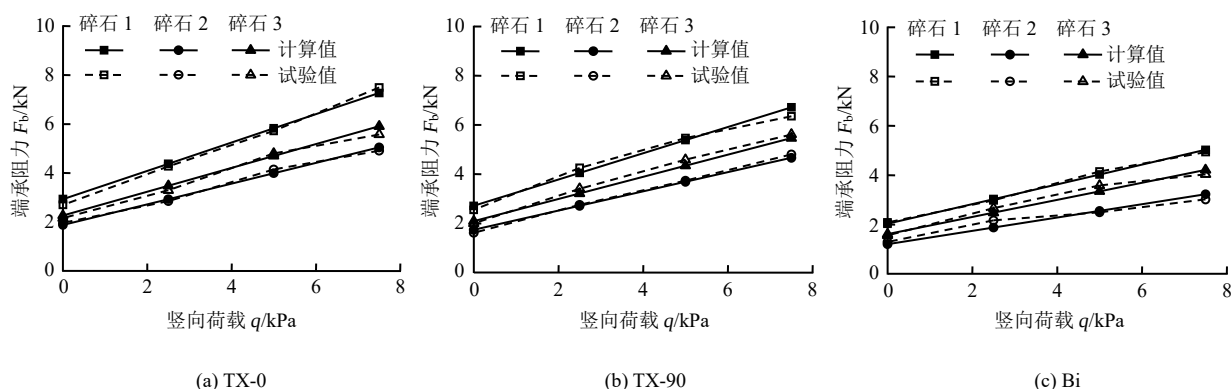


图 17 端承阻力试验值与计算值对比

Fig.17 Comparison between experimental and calculated values of bearing resistance

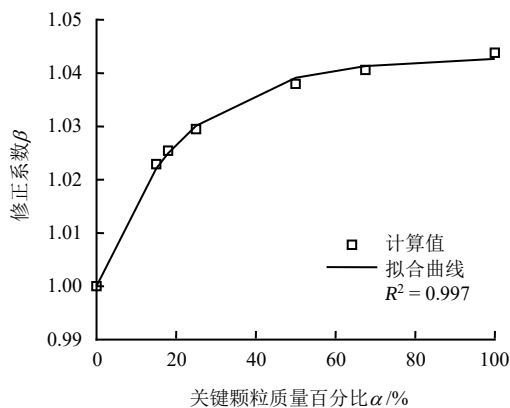


图 18 修正系数与关键颗粒质量百分比曲线

Fig.18 Curve of modified coefficient and key particle mass percent

达到最大值, 这意味着所有颗粒都可能稳定地嵌入到格栅网孔中。Brown 等^[30]研究了碎石与格栅之间的嵌固作用, 提出对于平均粒径为 50 mm 的填料, 格栅网孔合理范围在 60~80 mm 之间, 这与本文研究成果基本一致。综上所述, 本文提出了一种可以考虑颗粒嵌固作用的筋土界面最大拉拔阻力计算方法, 可以帮助设计人员根据填料级配合理选择土工格栅。

6 结 论

本文对两种类型的土工格栅和 3 种级配的碎石进行了共 60 次大尺寸拉拔试验, 研究了碎石颗粒嵌固作用对筋土界面力学特性影响, 得到结论如下:

(1) 拉拔阻力主要由土工格栅横肋或斜肋的端承阻力提供, 更高的竖向应力和更合理的颗粒级配可以提高格栅的加固效果。

(2) 冲剪破坏理论可以用于估算双向土工格栅在碎石中拉拔的端承阻力。用于三向格栅时需将斜肋的实际长度转换为有效剪切长度, 有效剪切长度为斜肋在垂直于拉拔方向上的投影长度。

(3) 颗粒嵌入对端承阻力有提高作用, 相当于增大了内摩擦角, 增大的部分为嵌固角, 最大约 1.2°。

(4) 提出了一种考虑嵌固作用影响的拉拔阻力计算方法, 该方法引入了关键颗粒的概念, 以关键颗粒在总颗粒中的质量百分比作为参数, 估算颗粒嵌入对拉拔阻力的影响。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] TUTUMLUER E, HUANG Hai, BIAN Xue-cheng. Geogrid-aggregate interlock mechanism investigated through aggregate imaging-based discrete element modeling approach[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2012, 12(4): 391-398.
- [3] 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): 954-962.
- CHEN Cheng, DUAN Yong-da, RUI Rui, et al. Study of single and two-layer geogrid reinforced ballasted trackbed using pull-out test and discrete element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(4): 954-962.
- [4] 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): 1735-1744.
- BAO Cheng-gang. Study on interface behavior of geosynthetics and soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(9): 1735-1744.
- [5] 杨广庆, 李广信, 张保俭. 土工格栅界面摩擦特性试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2017, 16(4): 35-39.
- YANG Guang-qing, LI Guang-xin, ZHANG Bao-jian. Experimental studies on interface friction characteristics of geogrids[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 16(4): 35-39.
- [6] CHEN C, MCDOWELL G R, THOM N H. Investigating geogrid reinforced ballast: experimental pull-out tests and discrete element modelling[J]. **Soils and Foundations**, 2014, 54(1): 1-11.
- [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): 960-964.
- CHEN Rong, LUAN Mao-tian, ZHAO Wei, et al. Research on pull-out test and frictional resistance characteristic of geogrids[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(4): 960-964.
- [8] 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 Jia-quan, LU Meng-liang, ZHOU Yue-fu, et al. Bearing characteristics of reinforced soil with longitudinal and transverse ribs of geogrids[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(1): 186-193.
- [9] SADAT TAGHAVI S H, MOSALLANEZHAD M. Experimental analysis of large-scale pullout tests conducted on polyester anchored geogrid reinforcement systems[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2017, 54(5): 621-630.
- [10] 陈榕, 王喜强, 郝冬雪, 等. 季节性冻土中土工格栅加筋特性试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2019, 41(6): 1101-1107.
- CHEN Rong, WANG Xi-qiang, HAO Dong-xue, et al. Experimental investigation on reinforced characteristics of geogrids in seasonal frozen soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(6): 1101-1107.
- [11] NGOC T N, BUDDHIMA I, CHOLACHAT R. Modelling geogrid-reinforced railway ballast using the discrete element method[J]. **Transportation Geotechnics**, 2016, 8: 86-102.
- [12] KWON J, TUTUMLUER E. Geogrid base reinforcement with aggregate interlock and modeling of associated stiffness enhancement in mechanistic pavement analysis[J]. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2009, 2116(1): 85-95.
- [13] SWETA K, HUSSAINI S K K. Effect of shearing rate on the behavior of geogrid-reinforced railroad ballast under direct shear conditions[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2018, 46(3): 251-256.
- [14] SWETA K, HUSSAINI S K K. Behavior evaluation of geogrid-reinforced ballast-subballast interface under shear condition[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2019, 47(1): 23-31.
- [15] DONG Yan-li, HAN Jia-lun, BAI Xiao-hong. A numerical study on stress-strain responses of biaxial geogrids under tension at different directions[C]//Proceedings of GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design. Reston, America: [s. n.], 2010: 2551-2560.
- [16] DONG Yan-li, HAN Jia-lun, BAI Xiao-hong. Numerical analysis of tensile behavior of geogrids with rectangular and triangular apertures[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2011, 29(2): 83-91.

- [17] GIROUD J P. An assessment of the use of geogrids in unpaved roads and unpaved areas[C]//Proceedings of Jubilee Symposium on Polymer Geogrid Reinforcement Conference. Blackburn, UK: [s. n.], 2009: 23-36.
- [18] 郑俊杰, 曹文昭, 周燕君, 等. 三向土工格栅筋-土界面特性拉拔试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 317-324.
- ZHENG Jun-jie, CAO Wen-zhao, ZHOU Yan-jun, et al. Pull-out test study of interface behavior between triaxial geogrid and soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 317-324.
- [19] HAN Bing-ye, LING Jian-ming, SHU Xiang, et al. Resilient interface shear modulus for characterizing shear properties of pavement base materials[J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2018, 30(12): 04018333.
- [20] QIAN Y, MISHRA D, TUTUMLUER E, et al. Characterisation of geogrid reinforced ballast behavior at different levels of degradation through triaxial shear strength test and discrete element modeling[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2015, 43(5): 393-402.
- [21] 中华人民共和国铁道部. TB 10102—2010 铁路工程土工试验规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB 10102—2010 Code for soil test of railway engineering[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [22] 中国铁路总公司. Q/CR 549.2—2016 铁路工程土工合成材料 第 2 部分: 土工格栅[S]. 北京: 中国铁路总公司, 2016.
- China Railway Corporation. Q/CR 549.2—2016 Geosynthetics in railway engineering part 2: geogrid[S]. Beijing: China Railway Corporation, 2016.
- [23] 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.
- [24] JEWELL R A. Soil reinforcement with geotextiles[M]. London: CIRLA Special Publication, 1996.
- [25] BERGADO D T, HARDIYATIMO H C, CINEROS C B. Pull-out resistance of steel geogrids with weathered clay as backfill material[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1992, 15(1): 33-46.
- [26] JEWELL R A. Reinforcement bond capacity[J]. **Géotechnique**, 1990, 40(3): 513-518.
- [27] 苗晨曦. 格栅加筋粗粒料界面细观特性及性能优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- MIAO Chen-xi. Mesoscopic analysis of the interface properties of geogrid-reinforced coarse aggregate with the optimization of reinforcement performance[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [28] 郑俊杰, 苗晨曦, 谢明星, 等. 界面特性及填料粒径影响格栅加筋性能的离散元研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1423-1428.
- ZHENG Jun-jie, MIAO Chen-xi, XIE Ming-xing, et al. Interface properties and influence of particle size on geogrid reinforcement performance by DEM[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(8): 1423-1428.
- [29] 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): 1249-1260.
- WANG Jia-quan, KANG Bo-wen, ZHOU Yuan-wu, et al. Effect of coarse particle content on pull-out behavior of reinforced-soil interface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(5): 1249-1260.
- [30] 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.