

DOI: 10.11779/CJGE20240372

# 土工格栅与砾性土界面特性的拉拔试验研究

王家全<sup>1,2</sup>, 林 鸿<sup>1,2</sup>, 韦林邑<sup>1,2</sup>, 唐 毅<sup>\*1,2</sup>

(1. 广西科技大学土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 广西壮族自治区岩土灾害与生态治理工程研究中心, 广西 柳州 545006)

**摘 要:** 路基工程中, 长期受到上部荷载作用的加筋砾性土填料易发生细粒侵入现象, 造成筋土界面力学特性劣化。基于拉拔速率、相对密实度、法向应力等因素, 对土工格栅与不同细粒含量的含高塑性细粒砾性土进行拉拔试验, 探讨了多因素耦合对筋土界面强度特性与体变特性的影响规律。研究结果表明: 在不同拉拔速率下, 细粒含量增加会导致拉拔阻力曲线由硬化变为软化, 界面剪缩性逐渐增强。中密实度时, 细粒含量 0% 的拉拔阻力曲线由于颗粒分布不均匀出现阶梯式下降。剪缩性在低密实度、高细粒含量时显著。法向应力相同时, 细粒含量提高会导致峰值拉拔阻力和位移减少, 制约剪胀性。综合摩擦因数比  $K$  与法向应力  $\sigma_v$ 、细粒含量  $F_c$  呈幂函数关系。细粒含量 10% 为砾性土界限细粒含量, 该细粒含量下的土工格栅与砾性土的拉拔界面强度与变形特性发生过渡变化, 体变从剪胀向剪缩转化, 界面强度逐渐降低。

**关键词:** 路基工程; 细粒含量; 拉拔试验; 界面特性

中图分类号: TU416.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)08-1711-10

**作者简介:** 王家全(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事加筋土结构、地基基础工程、土木工程灾害防治等方面的工作。E-mail: wjquan1999@163.com。

## Interface characteristics of geogrid and gravelly soil by pullout tests

WANG Jiaquan<sup>1,2</sup>, LIN Hong<sup>1,2</sup>, WEI Linyi<sup>1,2</sup>, TANG Yi<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Engineering Research Center of Geotechnical Disaster and Ecological Control, Liuzhou 545006, China)

**Abstract:** In the field of roadbed engineering, the reinforced gravelly soil filling materials subjected to long-term upper loads are prone to phenomena such as intrusion of fine particles, leading to the deterioration of the mechanical properties at the reinforcement-soil interface. The pullout tests on the geogrid and gravelly soil with different contents of high plastic fine particles are conducted based on the factors such as pull-out rate relative compactness and normal stress. The influence rules of multi-factor coupling on the strength characteristics and volume change characteristics of the reinforced soil interface are discussed. The research findings indicate that under different pulling rates, the increase in fine particle content causes the pullout resistance curve to transition from hardening to softening, with the interfacial shear shrinkage gradually increasing. The particle contact state within the specimen at medium compaction is uneven, and the pull-out resistance curve shows a stepwise decline at content of fine particles the of 0%. The shear shrinkage is significant at low compaction density and high content of fines particles. When the normal stress is the same, an increase in the content of fine particles leads to a reduction in the peak pull-out resistance and displacement, constraining dilatancy. The comprehensive friction factor ratio is in a power function relationship with the normal stress and content of fine particles. The content of fine particles of 10% is the limit one of gravelly soil, and the pullout interface strength and deformation characteristics between geogrid and gravel soil change from dilatancy to shear shrinkage, and the interface strength decreases gradually.

**Key words:** subgrade engineering; fine particle content; pullout test; interface characteristic

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (52468047); 广西自然科学基金重点项目 (2022GXNSFDA035081); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目 (桂教人才 (2020) 6 号); 广西科技大学研究生教育创新计划项目 (GKYC202463) The work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.52468047), the Key Program of Natural Science Foundation of Guangxi Province (Grant No.2022GXNSFDA035081), the High-Level Innovation Team and Outstanding Scholars Program of Guangxi Institutions of Higher Learning of China (Grant No.GuiJiaoRenCai[2020]6), and the Innovation Project of Guangxi University of Science and Technology Graduate Education (Grant No.GKYC202463).

收稿日期(Received): 2024-04-05 修回日期(Revised): 2024-09-12 接受日期(Accepted): 2024-10-13 网络出版日期(Online): 2024-10-14

\*通信作者 (E-mail: tyi-moon@163.com)

0 引言

砾性土填料具备良好的抗压与抗剪性能，但其承受拉应力的能力不佳，国内外学者通过在填料中埋入土工合成材料以克服该缺陷<sup>[1-2]</sup>。将抗拉材料（即筋材）置入填料内，通过筋材与填料接触面的摩擦力来部分约束填料的横向位移，可以增强土体界面强度和刚度。

土工格栅是一种广泛使用的加筋材料，它具备出色的耐蚀性、高抗拉强度、高弹性模量和低蠕变行为，并且与土体之间的嵌锁作用十分显著<sup>[3]</sup>。作为一种网状结构的特种土工材料，土工格栅在承担拉力时，其与填料间的摩擦特性对加筋土结构的性状有重要影响<sup>[4]</sup>。为了准确理解土工格栅的加筋机制，对填料与土工格栅界面间的作用机理进行深入研究是至关重要的，这需要结合理论分析与试验研究来共同探讨。

目前，加筋土理论主要包括 6 种主流观点：剪切带理论<sup>[5]</sup>、界面摩擦理论、周围土体应力场与位移场作用理论<sup>[6]</sup>、约束增强理论<sup>[7]</sup>、等效附加应力法理论<sup>[8]</sup>、张力膜理论<sup>[9]</sup>。这些理论为加筋土技术的研究和发展提供了重要的理论基础。在加筋土结构设计和分析中，筋土界面的拉拔性能是一个关键技术指标，受到高度关注。大尺寸拉拔试验是一种用来研究筋土界面基本力学特性的有效方法<sup>[10-11]</sup>，该试验可以测量在一定埋深条件下土工格栅在土体中双面受力时的力-变形关系，充分反映筋材与土体间的摩擦、嵌固及咬合作用。Abdi 等<sup>[12]</sup>利用 PIV 技术探究了金属钉增强土工格栅抗拔力的效果，Wang 等<sup>[13]</sup>通过拉拔试验研究格栅横肋及上部荷载边界对筋土相互作用的耦合效应，Ghazavi 等<sup>[14]</sup>提出了非饱和土中格栅拉拔阻力与土体变形的关系方程，Maleki 等<sup>[15]</sup>分析了 L 型锚固方式对格栅抗拔力的影响。

公路工程中，服役时间较长的道路路基填料易受到细粒侵入的影响，填料在混入细粒后其性能会发生变化。故本文以不同细粒含量的砾性土为研究主体，探讨法向应力、拉拔速率、相对密实度对筋土界面拉拔特性的影响，揭示峰值拉拔阻力、界面强度参数、竖向位移的变化规律，研究结果可为加筋土工程设计提供理论参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验仪器与材料

试验设备为型号 DW1290HP 的卧式直剪拉拔测试系统，如图 1 所示。主要由试验盒、法向压力施加系统、水平移动控制系统以及数据采集系统构成。本

次试验选择了拉拔试验模式，其中试验盒由上盒和下盒两部分组成。上盒长为 400 mm，宽为 200 mm，高为 270 mm，由航空铝材拼接，下盒长为 730 mm，宽为 200 mm，高为 200 mm，由钢板拼接，设备最高可输出的竖向压力为 50 kN，压力输出可由法向电缸内的油压阀来调节。法向压力施加系统包含竖向伺服电缸、压力传感器、位移传感器三部分。水平控制系统包含右端拉拔伺服电机、左端剪切伺服电机、压力传感器和位移传感器，拉拔试验由右端拉拔电缸控制。在试验过程中，数据通过高精度荷载和位移传感器以及相应的软件自动记录，并在试验完成后可以保存和导出。

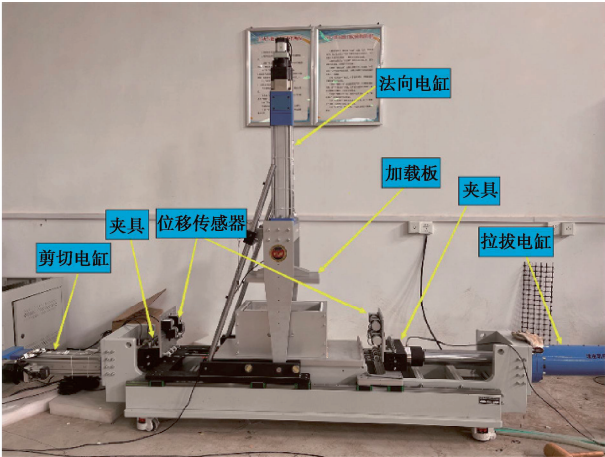


图 1 试验设备

Fig. 1 Test equipment

试验土样取自广西柳州本地某河堤，经过冲洗、烘干后通过筛分试验得到粒径大小范围在 0.5~10 mm 的级配良好砾性土。细粒土采用广西柳州某公园内红黏土，经烘干、破碎、研磨后取过 0.075 mm 筛网的土粒，通过室内试验得其物理指标，如表 1 所示。

表 1 细颗粒土物理性质指标

Table 1 Physical property indices of fine-grained soil

相对质量 密度 $G_s$	最大干密 度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	液限/ %	塑限/ %	最优含水率/ %
2.65	1.595	66.0	37.4	27.3

将砾性土与细粒按照不同比例进行充分拌合，配制出细粒含量（细颗粒质量在混合土样总质量中的比例）为 0%，10%，20%，30% 的混合土样，经掺配后的不同细粒含量砾性土的颗粒级配曲线如图 2 所示。

土工格栅采用型号为 TGSG3030 的双向塑料土工格栅，格栅长宽尺寸为 200 mm×140 mm。具体物理性质参数见表 2，表 3 为不同细粒含量砾性土的级配组成情况。

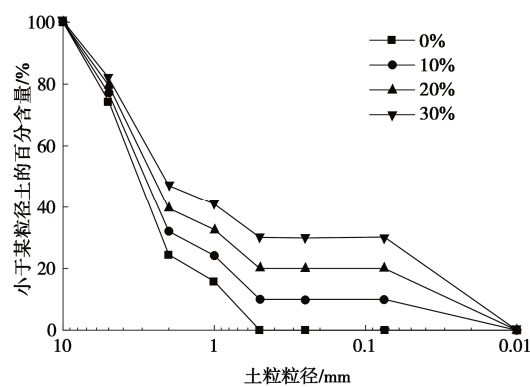


图 2 颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves

表 2 土工格栅物理指标

Table 2 Physical indices of geogrid

土工格栅 型号	极限抗拉 强度/ (kN·m <sup>-1</sup> )		极限延伸 率/%		纵横肋 尺寸/mm		网孔 尺寸/ (mm× mm)
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	
TGSG3030	35.78	33.51	10.0	8.7	4.5	5.3	30×30

表 3 不同细粒含量试样级配组成

Table 3 Compositions of samples with different contents of fine particles

细粒含量/%	$d_{10}/\text{mm}$	$d_{30}/\text{mm}$	$d_{60}/\text{mm}$	$C_u$	$C_c$
0	0.750	2.300	3.30	5.20	1.81
10	0.075	1.750	2.90	48.00	11.34
20	0.027	0.860	2.55	118.52	8.56
30	0.019	0.075	2.20	147.37	0.11

1.2 试验方法及方案

按照试验方案设定的相对密实度, 根据试验盒的体积计算所需砾性土填料的质量。在进行填料前, 在试验盒内均匀涂抹凡士林以减少侧壁的摩擦。装样方式为分层装样, 从下至上每层填料装样完毕后进行击实并用刮板进行刮毛处理以保证土层间的结合。下盒装样结束后, 将试验格栅平铺放置于土体表面, 用拉拔端夹具固定, 然后安装上盒并确保上下盒对齐, 继续进行分层装样。装样完成后, 将上表面整平, 利用控制系统将加载板降至上盒表面, 进行预压处理。预压完成后, 在控制软件中按照试验方案设定法向力与拉拔速率开始试验, 当拉拔阻力出现峰值或达到稳定值后终止试验<sup>[16]</sup>。

国内外拉拔试验中对拉拔速率的研究结论尚不一致<sup>[17]</sup>, 同时对不同密实状态下的筋土界面探讨较少, 故本次试验对不同细粒含量砾性土填料进行不同法向应力、相对密实度、拉拔速率的拉拔试验, 具体方案见表 4。

表 4 试验方案

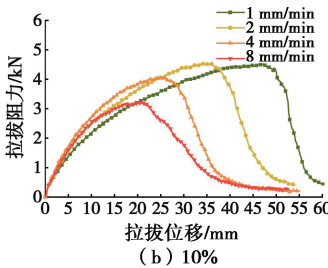
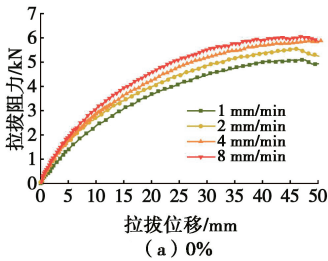
Table 4 Test schemes

细粒含量/ %	法向应力/ kPa	拉拔速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	相对密实度 $D_r$
0, 10, 20, 30	40, 60, 80	1	0.7
0, 10, 20, 30	60	1, 2, 4, 8	0.7
0, 10, 20, 30	60	1	0.2, 0.45, 0.7

2 拉拔试验结果与分析

2.1 拉拔速率对筋土界面的影响

图 3 为不同细粒含量下各拉拔速率的拉拔阻力与拉拔位移曲线图。由图 3 可知, 在细粒含量为 0% 时, 不同拉拔速率下曲线为应变硬化型, 出现峰值拉拔阻力的拉拔位移大小相近, 说明砾性土在未混入细粒土时, 格栅的嵌固咬合力大, 筋土界面处颗粒随着格栅拔出主要发生水平位移, 拉拔速率对拉拔阻力曲线的发展趋势影响较小。在细粒含量为 10% 时, 随着拉拔速率的提高, 曲线逐渐由应变硬化转变为应变软化, 峰值拉拔阻力时的拉拔位移也逐渐减小, 从 47.2 mm 减小至 20.17 mm, 减小了 27.03 mm, 降幅达 57.3%, 说明该含量下曲线发展趋势受拉拔速率影响较大, 在拉拔速率低时, 剪切带内的土颗粒有充足时间进行重新排列, 筋材与颗粒间的嵌固咬合作用效果强, 发生错位转动的情况较少, 颗粒水平位移较大, 而在拉拔速率较高时, 颗粒重排时间较短, 故与土工格栅的相互作用减弱, 界面处的颗粒发生较多转动, 导致曲线规律不一致。在细粒含量为 20%, 30% 时, 曲线均表现为应变软化型, 出现峰值拉拔阻力的剪切位移相近, 说明细粒含量的进一步提高, 在界面处砾性土颗粒会受到细颗粒的裹挟, 导致与筋材的接触不良, 颗粒随着格栅拔出主要以错位转动为主, 拉拔速率对曲线发展趋势影响减小。





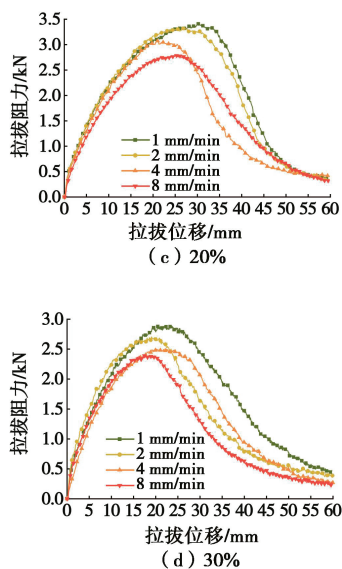


图3 不同细粒含量下拉拔阻力-拉拔位移曲线

Fig. 3 Pullout resistance-displacement curves with different contents of fine particle

图4为不同拉拔速率的峰值拉拔阻力关系曲线。相同拉拔速率下,细粒含量的增加会引起峰值拉拔阻力的下降,如拉拔速率2 mm/min时,细粒含量为0%,10%,20%,30%对应的峰值拉拔阻力为5.55,4.53,3.32,2.70 kN,最终降幅为51.35%,表明细颗粒会影响颗粒间的接触状态,使受力骨架的粗颗粒间接触量减少,同时也减弱了格栅对土颗粒的围锁作用,使峰值拉拔阻力下降。同时,相同细粒含量下,峰值拉拔阻力随拉拔速率的增加而增大,但在细粒含量0%时,拉拔速率1,2,4,8 mm/min时的峰值拉拔阻力大小分别为5.09,5.55,5.88,6.05 kN,增幅为9.04%,15.52%,18.86%。此外,随着细粒含量的增加,峰值拉拔阻力的变化规律转变为随着拉拔速率的增加而减小的趋势,且在细粒含量0~10%区间的峰值拉拔阻力曲线存在交汇,此交汇处的峰值拉拔阻力受拉拔速率的影响较小。

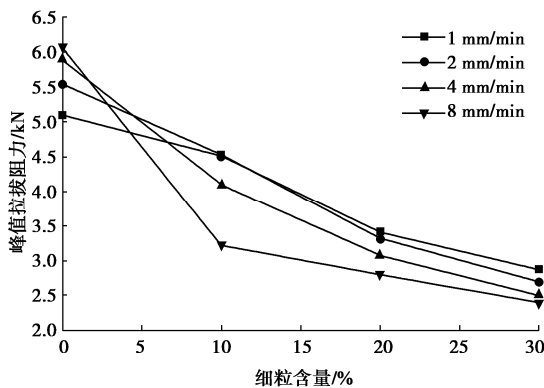
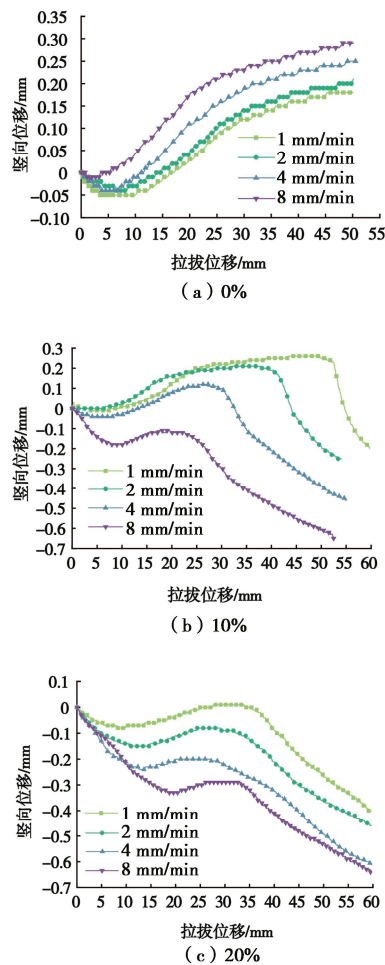


图4 不同拉拔速率下峰值拉拔阻力

Fig. 4 Peak pulling resistances at different pulling rates

图5为不同细粒含量下各拉拔速率的竖向位移-拉拔位移曲线,规定剪胀为正,剪缩为负。由图5可知,在0%细粒含量时,界面先发生短暂剪缩,而后进入快速线性增长的剪胀阶段,至一个拐点后增长速率下降,继续发生剪胀直至试验结束。在相同拉拔位移时,拉拔速率越大,竖向位移越大,界面最终表现为剪胀,说明砾性土未混入细粒土时,剪胀性较强。在细粒含量为10%时,在经历剪缩、剪胀阶段后,界面再次发生剪缩现象,这是由于格栅被拔出留在土体内的格栅长度缩短导致。剪缩幅度随拉拔速率增大而变小,与拉拔阻力曲线的发展相符,在拉拔位移相同时,拉拔速率的增大会导致竖向位移的减小,而曲线出现剪胀拐点的位移也提前,界面最终表现出剪缩,说明细粒增加,会使土质变松散,砾性土发生翻越相邻土层的错位移动减少,而土工格栅的拔出会导致界面空隙增多,加上细颗粒本身压缩性较大,从而使筋土界面剪缩性更强。在细粒含量为20%时,曲线仅经历一次增长较为缓慢的剪胀过程,随后发生剪缩。在细粒含量为30%时,剪胀阶段转变为体积不变的平稳阶段,由于峰值拉拔阻力出现的剪切位移处在该阶段,故在讨论最大剪胀量时将平稳阶段的竖向位移大小视作为最大剪胀量。





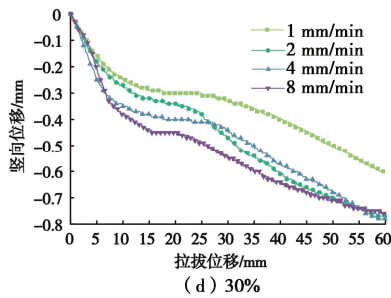


图5 不同细粒含量下竖向位移-拉拔位移曲线

Fig. 5 Vertical displacement-pullout displacement curves with different contents of fine particles

图6为最大剪胀量汇总图。由图16可知,细粒含量0%时,随着拉拔速率的增加,最大剪胀量由0.18 mm增至0.29 mm,增幅为61.1%,说明砾性土未混入细粒土时,由于颗粒与土工格栅咬合紧固,随着格栅拔出速率加快,筋土界面的颗粒转动越明显,同时带动相邻土层间的颗粒越容易发生偏转,使土样剪胀性增强。混入细粒土后,筋土界面处最大剪胀量随着拉拔速率增加而减小,以细粒含量10%为例,拉拔速率1, 2, 4, 8 mm/min对应的最大剪胀量为0.26, 0.21, 0.12, -0.11 mm,最终减少了0.37 mm,降幅达142.3%,表明细颗粒减少了砾性土的滚动、翻转,导致土体内小空隙增多更易被压缩,使剪胀性减弱。砾性土混入细粒土后,在相同拉拔速率条件下,最大剪胀量随细粒含量增加而减小,如拉拔速率为4 mm/min时,最大剪胀量由0.12 mm减小至-0.41 mm,减小了0.53 mm,降幅达441.7%,意味着细粒含量是影响界面体变特性的关键因素。

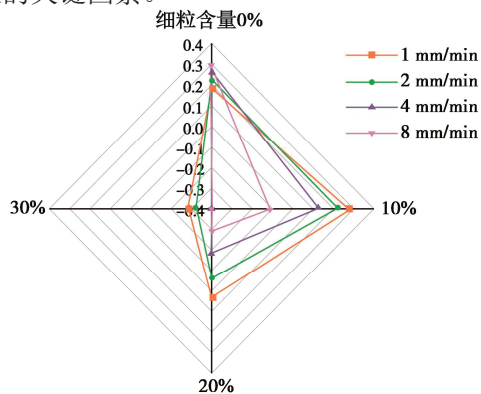


图6 不同拉拔速率下的最大剪胀量

Fig. 6 Maximum dilations under different contents of fine particles

## 2.2 相对密度对筋土界面的影响

由图7可知,不同细粒含量下,随着拉拔位移增大,曲线均经历爬升阶段,该阶段的爬升幅度随相对密实度的增加而增加,达到峰值拉拔阻力的拉拔位移也随着相对密实度的增加而增大,峰值过后,中、低密实度的砾性土均表现出应变软化的特征,而高密实度时,随着细粒含量增加,逐渐由应变硬化型曲线转

变为应变软化型曲线。特别的,在细粒含量0%时,中密实度的曲线在峰值之后出现“阶梯式”的突变软化下降趋势,与王家全等<sup>[18]</sup>的曲线特征类似,主要原因是在中密实度时,土体内部处于密实与松弛的中间态,筋土界面处颗粒的接触状态不均匀,在经历峰值拉拔阻力后,格栅与颗粒接触关系在紧密、松散间不断反复,界面处颗粒对格栅的摩擦力不足以支撑其均匀拔出,每经历一次峰值便发生格栅的滑移,导致软化阶段的拉拔阻力出现不稳定的现象。

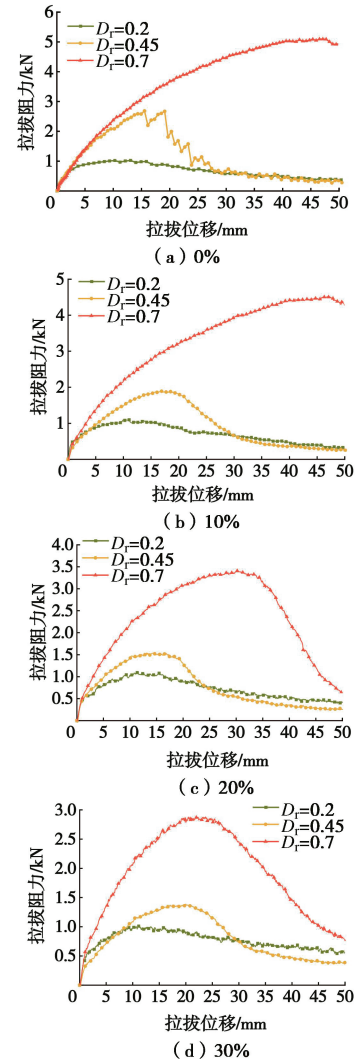


图7 不同细粒含量下拉拔阻力-拉拔位移曲线

Fig. 7 Pullout resistance-displacement curves with different contents of fine particles

图8为不同相对密度下峰值拉拔阻力的变化趋势,在中、高密实度时,随着细粒含量的增加,峰值拉拔阻力不断降低,以中密实度为例,细粒含量0~30%时的峰值拉拔阻力分别为2.69, 1.89, 1.54, 1.39 kN,最终减小了1.3 kN,降幅为48.3%,表明细颗粒会削弱加筋作用导致抗拔性能减弱。而在低密实度时,峰值拉拔阻力稳定在1 kN左右,说明在低密实度时,土体本身抗拔性能差,细粒含量的增加对其影响不大。

在相同细粒含量下, 峰值拉拔阻力随相对密度增加而提高, 在细粒含量 0% 时, 低、中、高密实度的峰值拉拔阻力为 1.03, 2.69, 5.09 kN, 增大了 4.06 kN, 增幅达 397.1%, 此增幅在细粒含量增加后会不断减小, 在细粒含量 30% 时增幅为 185%。

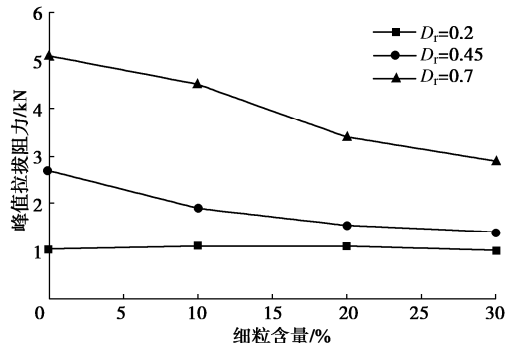
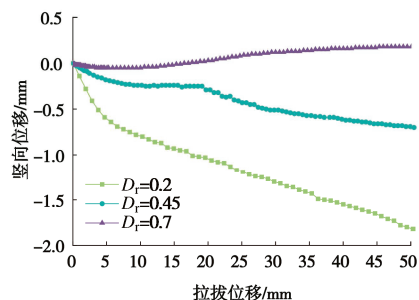


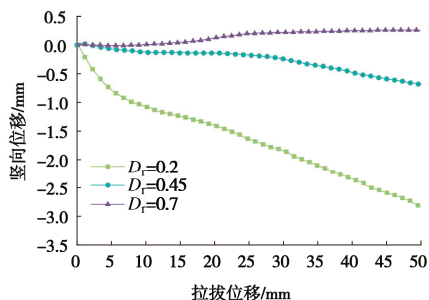
图 8 不同相对密度下峰值拉拔阻力

Fig. 8 Peak pullout resistances under different relative densities

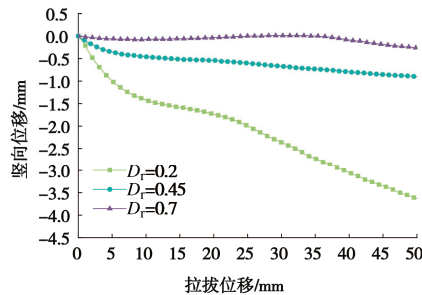
由图 9 可知, 在中、低密实度时, 筋土界面的体积变化始终呈现出剪缩性, 而在高密实度时, 试样在细粒含量较低时能体现微弱的剪胀性, 随着细粒含量的增加, 剪缩性逐渐增强。分析其原因, 当相对密度较高时, 拉拔界面处砾性土颗粒与土工格栅接触较为密实, 周围土体受压密实孔隙较小, 在土工格栅拉拔过程中格栅与粗颗粒错位翻转更容易发生土体剪胀。反之, 当相对密度较低时, 界面处砾性土颗粒与土工格栅接触较松, 周围土体不密实孔隙较大, 在法向压力作用下, 土工格栅拉拔时土体更易产生剪缩变形, 而随着细粒含量提高, 筋土界面处粗颗粒受拉拔剪切作用发生翻转位移, 其产生的孔隙变化更易由周围的细颗粒填充, 细颗粒在拉拔过程中不断被充填压缩在粗颗粒的孔隙中, 故相对密度越低, 细粒含量越高, 界面剪缩性越强。



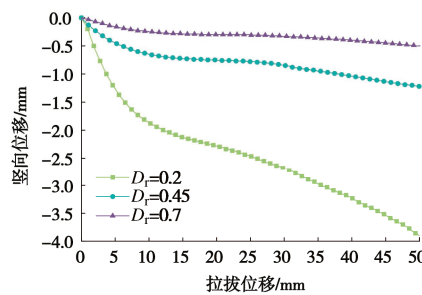
(a) 0%



(b) 10%



(c) 20%



(d) 30%

图 9 不同细粒含量下竖向位移-拉拔位移曲线

Fig. 9 Vertical displacement-pullout displacement curves with different contents of fine particles

图 10 为最终体变量的汇总图。由图 10 分析得到, 在相同细粒含量时, 相对密度的减小会引起最终体变量的降低, 如细粒含量为 10% 时, 高、中、低密实度时最终体变量大小为 0.18, -0.7, -1.82 mm, 最终减小了 2 mm, 降幅达 1111.1%, 而在相对密度相同时, 最终体变量随细粒含量的增加最终会减小, 如中密实度时, 最终体变量从 -0.7 mm 降低至 -1.22 mm, 减少了 0.52 mm, 降幅为 74.3%。

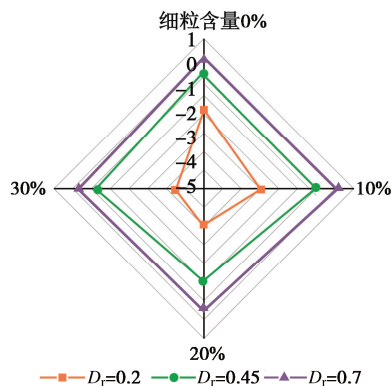


图 10 不同细粒含量下的最终体变量

Fig. 10 Final volume changes under different contents of fine particles

### 2.3 法向应力对筋土界面的影响

图 11 给出了不同法向应力下砾性土在不同细粒含量时的拉拔阻力-拉拔位移曲线。由图 11 可以观察到, 在不同法向应力下, 随着细粒含量增加, 出现峰值拉拔阻力时的拉拔位移逐渐减小, 且应变软化越显著。如法向应力为 60 kPa 时, 细粒含量为 0~30% 时峰值拉拔阻力的拉拔位移分别为 47.52, 46.2, 30.2,

23.71 mm, 表明细颗粒在减低峰值拉拔阻力的同时, 还延缓了峰值拉拔阻力的出现时间。在细粒含量 0% 时, 拉拔阻力随拉拔位移的增加而增大, 曲线特征表现为应变硬化, 而在细粒含量 10%, 20%, 30% 时, 随拉拔位移逐渐增大至峰值后开始减小, 表现出应变软化的特征, 且剪切结束时的拉拔阻力趋于一致, 这表明随着细粒含量的不断增加, 级配逐渐不良, 砾性土抗拔性能逐渐减弱, 曲线逐渐由应变硬化转变为应变软化。软化阶段拉拔阻力的降幅随细粒含量提高不断减小, 这是由于达到峰值拉拔阻力后, 土工格栅受到摩擦阻力逐渐由细颗粒的摩擦作用产生, 细粒含量越高在拉拔后期受到的摩擦作用越小。在同一细粒含量下, 峰值拉拔阻力随法向应力的增加而增大, 细粒含量 0~30% 的增量分别为 0.5, 0.64, 0.86, 0.98 kN。未混入细粒土时, 不同法向应力时达到峰值拉拔阻力时的拉拔位移相似, 在 55 mm 左右。砾性土混入细粒土后, 随着法向应力的增加, 出现峰值拉拔阻力的拉拔位移大小不断增大, 以细粒含量 30% 为例, 法向应力 40, 60, 80 kPa 的峰值拉拔阻力的剪切位移分别是 19.88, 23.71, 25.26 mm。

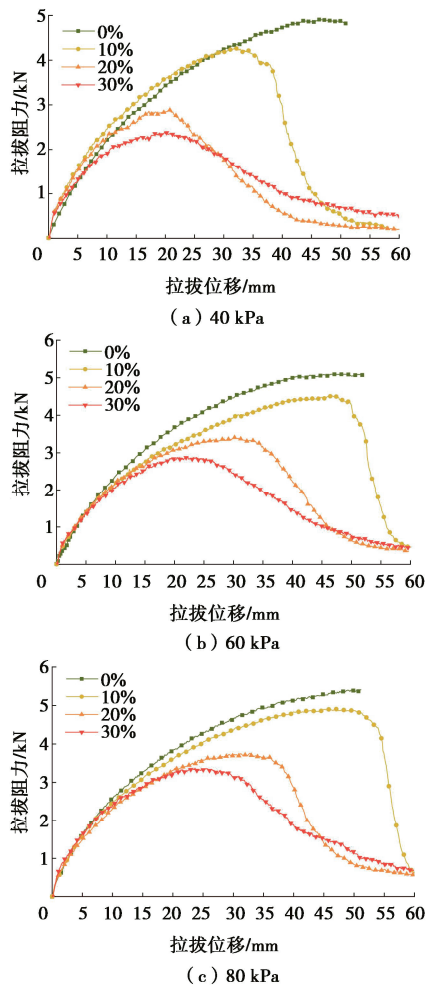


图 11 不同法向应力下拉拔阻力-拉拔位移曲线

Fig. 11 Pullout resistance-displacement curves under different normal stresses

图 12 给出了峰值拉拔阻力变化曲线。由图 12 可

以观察到, 在同一法向应力条件下, 峰值拉拔阻力随细粒含量的增加而逐渐减小, 如法向应力 60 kPa 时, 细粒含量为 0~30% 时的峰值拉拔阻力分别为 5.09, 4.52, 3.41, 2.88 kN, 降幅为 43.4%, 说明细颗粒减弱了筋土界面颗粒间的摩擦、咬合作用。

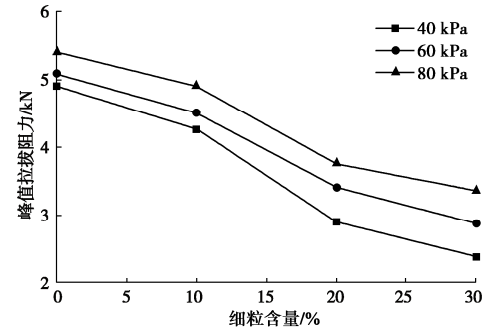


图 12 不同法向应力下峰值拉拔阻力

Fig. 12 Peak pullout resistances under different normal stresses

图 13 为不同细粒含量下土工格栅-砾性土界面竖向位移变化曲线。从图 13 中可知, 在细粒含量 0% 时, 曲线首先经历短暂剪缩阶段, 而后发生剪胀, 剪胀先经历快速剪胀与慢速剪胀两个过程, 直至试验结束, 筋土界面整体表现为剪胀。在细粒含量为 10%, 20% 时, 在经过剪缩后, 剪胀阶段的速率逐渐一致, 剪胀完成后, 由于土工格栅被缓慢拔出, 嵌入土中的格栅长度变短, 其对界面的嵌固作用减弱, 界面逐渐发生体积收缩现象, 与峰值拉拔阻力的下降相对应。在细粒含量为 30% 时, 由于细粒过多, 导致土体整体较为松散, 在法向应力作用下易发生体积压缩, 故在整个拉拔过程中表现出剪缩, 该细粒含量下的试样在剪缩中期, 有一段平稳的体积变化过程, 由拉拔阻力-拉拔位移曲线可知该阶段经历峰值拉拔阻力, 表明虽然峰值拉拔阻力出现, 但由于土质原因, 土体不会由剪缩发展为剪胀, 在讨论土体最大剪胀量时, 将稳定发展时的竖向位移当作最大剪胀量进行对比分析。

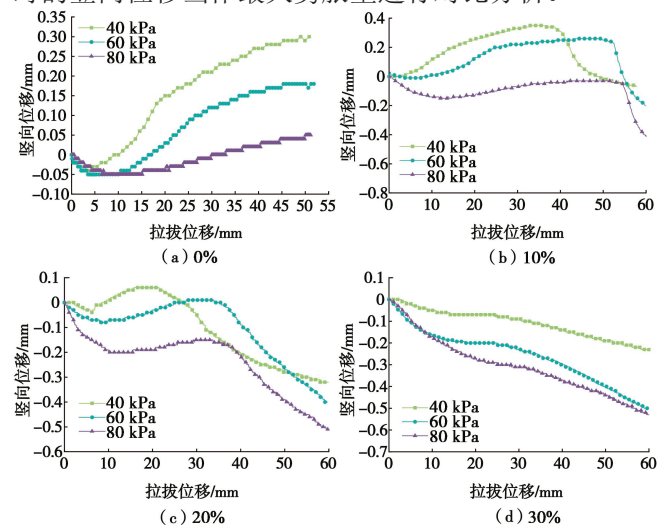


图 13 不同细粒含量下竖向位移-拉拔位移曲线

Fig. 13 Vertical displacement-pullout displacement curves with different contents of fine particles



图 14 为最大剪胀量示意图。由图 14 中可以观察到,不同细粒含量下,法向应力的提高会导致最大剪胀量的下降,以细粒含量 0% 为例,法向应力从 40 kPa 增大至 80 kPa 时,最大剪胀量由 0.3 mm 减小至 0.05 mm,降幅为 83.4%,这表明高法向应力会抑制界面处颗粒的位移,约束剪胀行为。在相同法向应力时,细粒含量的增加会导致最大剪胀量减小,以法向应力 60 kPa 为例,在细粒含量 30% 时的最大剪胀量为 -0.2 mm,与细粒含量 0% 时的 0.18 mm 相比,降幅达 211%,说明随着细粒含量的增加,土体内骨架逐渐变为细颗粒构成的骨架,而细颗粒相较于砾性土颗粒更易被压缩,故总体上会对砾性土造成约束剪胀的作用。

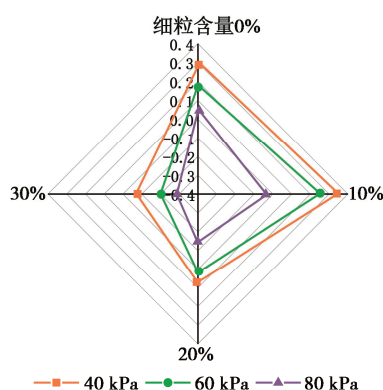


图 14 不同细粒含量下的最大剪胀量

Fig. 14 Maximum dilations under different contents of fine particles

图 15 为不同细粒含量下峰值剪应力随法向应力的演化曲线,对其进行线性拟合,发现不同细粒含量的砾性土峰值剪应力与法向应力拟合结果  $R^2$  均在 0.95 之上,说明试验结果符合莫尔-库仑强度破坏准则  $\tau_s = \sigma_v \tan \varphi_s + c_s$ 。试验规程中对拉拔摩擦系数的定义未能充分考虑到似黏聚力分量对界面强度的贡献,为了有效评估筋土界面的摩擦强度,同时考虑到表观黏聚力和表观摩擦角的影响,引入综合似摩擦角  $\varphi_{ss}$  和综合摩擦因数比  $K^{[19]}$  的概念:

$$K = \frac{\tan \varphi_{ss}}{\tan \varphi_s} = \frac{\tan \varphi_s + c_s / \sigma_v}{\tan \varphi_s} \quad (1)$$

式中:  $\tau_s$  为界面剪应力 (kPa);  $L, B$  分别为埋置土工格栅的长度与宽度 (m);  $c_s$  为界面似黏聚力 (kPa);  $\varphi_s$  为界面内摩擦角 ( $^\circ$ )。

由图 16 进一步分析可知:随着细粒含量的增加,界面似黏聚力降低,当细粒含量由 0% 增加至 30% 时,似黏聚力由 78.179 kPa 降至 25.198 kPa,降幅达 67.8%,内摩擦角则随着细粒含量的增加而提高,内摩擦角由  $12.735^\circ$  增至  $23.605^\circ$ ,增幅达 85.4%,但由于界面峰值剪应力随着细粒含量的增加而减小,说明对含细粒砾性土填料而言,似黏聚力是影响界面摩

擦强度的关键因素。细粒含量 0% 时,砾性土颗粒间的咬合力以宏观似黏聚力体现,随着细颗粒的增多,挤占粗骨架结构的受力节点,削弱了格栅横肋对土体的嵌锁作用,导致似黏聚力下降,而细粒与砾性土的矿物成分不同,细颗粒的存在填充了原本骨架内部的空隙,使大、小颗粒间接触增多,摩擦作用增强,导致内摩擦角增大。

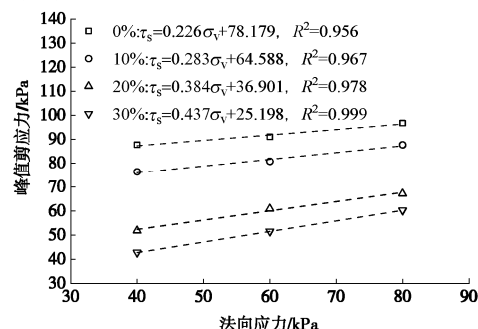


图 15 界面强度指标拟合曲线

Fig. 15 Fitting curves of interface strength index

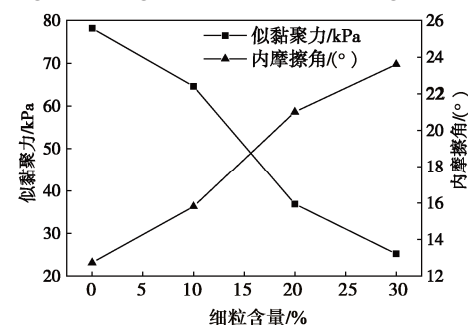


图 16 界面强度指标与细粒含量的关系

Fig. 16 Relationship between interface strength index and content of fine particle

绘出不同细粒含量下  $K$  值随法向应力的变化如图 17 所示。由图 17 可知,不同细粒含量的砾性土界面综合摩擦因数比  $K$  随法向应力增加、细粒含量提高而减小。通过幂函数进行拟合,发现拟合结果良好,表达式为

$$K = a \sigma_v^b \quad (2)$$

拟合参数  $a, b$  与相关系数  $R^2$  见表 5。

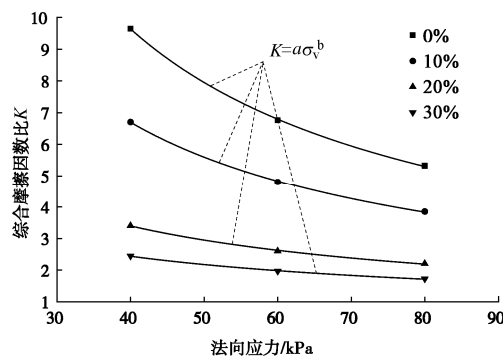


图 17 综合摩擦因数比与法向应力的关系

Fig. 17 Relationship between composite friction factor ratio and normal stress

表 5 不同细粒含量拟合参数与相关系数			
Table 5 Fitting parameters and correlation coefficients under different contents of fine particles			
细粒含量/%	拟合参数		相关系数 $R^2$
	$a$	$b$	
0	232.131	-0.862	0.9997
10	130.658	-0.805	0.9994
20	35.404	-0.636	0.9979
30	16.070	-0.511	0.9961

对参数  $a$ ,  $b$  与细粒含量  $F_c$  进行拟合, 如图 18 所示。发现  $a$  与细粒含量  $F_c$  呈双参数指数函数关系, 且随着细粒含量增加而减小,  $b$  与  $F_c$  呈线性增长关系。 $a$ ,  $b$  与  $F_c$  的关系式见式 (3), (4)。将式 (3), (4) 代入式 (2), 得到综合摩擦因数比  $K$  与法向应力  $\sigma_v$ 、细粒含量  $F_c$  的关系式 (5)。

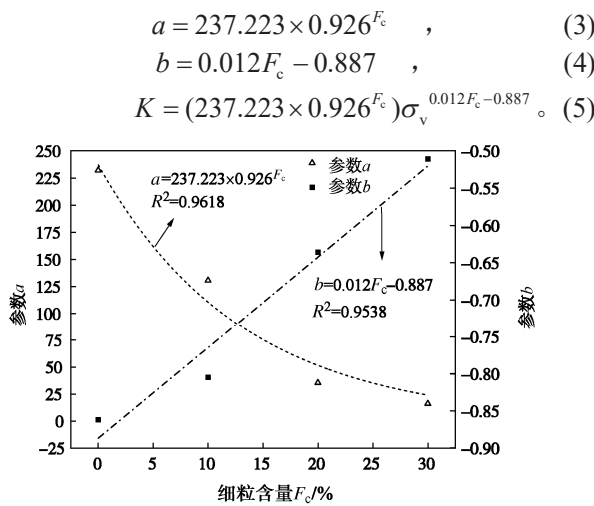


图 18 参数与细粒含量的拟合关系曲线

Fig. 18 Fitting relationship curves between parameters and content of fine particles

### 3 结 论

本文探讨了法向应力、拉拔速率、相对密实度对不同细粒含量砾性土填料界面拉拔性能的影响, 从拉拔阻力-拉拔位移关系、峰值拉拔阻力、竖向位移-拉拔位移关系、最大体变量、界面强度指标等方面分析干燥条件下含高塑性细粒砾性土界面强度与变形的变化规律与影响机理, 得到以下 4 点结论。

(1) 细粒含量 0% 时, 土工格栅与砾性土的拉拔阻力曲线均为应变硬化型, 细粒含量 20%, 30% 时, 曲线均为应变软化型; 而细粒含量 10% 时, 随拉拔速率提高拉拔阻力曲线由应变硬化转变为应变软化, 界面体变特性从剪胀性向剪缩性转化。

(2) 在密实状态下, 细粒含量较低时筋土拉拔界面仅出现微弱的剪胀性, 细粒含量大于 10% 以上, 剪缩性逐渐增强, 而在中密和疏松状态下, 筋土界面的体积变化始终呈现出剪缩性, 且相对密实度越低, 细

粒含量越高, 界面剪缩性越强。

(3) 相同法向应力时, 达到峰值拉拔阻力时的拉拔位移随细粒含量提高而减小, 峰值拉拔阻力也随之减小, 同时应变软化程度加剧, 界面剪胀性受到约束。细颗粒会降低粗颗粒间咬合力、增加颗粒间接触摩擦, 其中对摩擦力的作用显著影响界面峰值剪应力。综合摩擦因数比  $K$  与法向应力  $\sigma_v$ 、细粒含量呈幂函数关系,  $K$  随法向应力、细粒含量增大而减小。

(4) 细粒含量 10% 为含高塑性细粒砾性土的界限细粒含量, 土工格栅与砾性土的拉拔界面的强度与变形特性受细粒含量影响在 10% 处发生过渡变化, 体变从剪胀向剪缩转化, 界面强度逐渐降低。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 王家全、林鸿和唐毅参与实验设计; 王家全、林鸿完成实验操作; 王家全、林鸿、韦林邑、唐毅参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。The study was designed by WANG Jiaquan, LIN Hong and TANG Yi. The experimental operation was completed by WANG Jiaquan and LIN Hong. The manuscript was drafted and revised by WANG Jiaquan, LIN Hong, WEI Linyi and TANG Yi. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

### 参考文献:

[1] PILLAI A G, GALI M L. Role of particle shape on the shear strength of sand-GCL interfaces under dry and wet conditions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2022, **50**(2): 262-281.

[2] 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 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): 1249-1260. (in Chinese))

[3] GÓRSZCZYK J, MALICKI K. New approach to junction efficiency analysis of hexagonal geogrid using digital image correlation method[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2023, **51**(5): 70-80.

[4] LIU C H, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. An analytical model for particle-geogrid aperture interaction[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, **49**(1): 41-44.

[5] 黄文雄, 崔贤. 颗粒土中剪切带临界状态数学描述及其完全解[J]. 应用数学和力学, 2024, **45**(3): 287-294. (HUANG

- Wenxiong, CUI Xian. Mathematical description and complete solution of the critical state in the shear band of granular soil[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2024, **45**(3): 287-294. (in Chinese))
- [6] 王 伟. 有纺土工织物加筋软土地基的模型试验和机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, **22**(6): 750-753. (WANG Wei. Study on model tests and mechanism of soft soil foundation reinforced by geotextiles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, **22**(6): 750-753. (in Chinese))
- [7] 王 钊, 王协群. 土工合成材料加筋地基设计中的几个问题[J]. *岩土工程学报*, 2000, **22**(4): 503-505. (WANG Zhao, WANG Xiequn. Several problems in the design of geosynthetics reinforced foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, **22**(4): 503-505. (in Chinese))
- [8] 介玉新, 王乃东, 李广信. 加筋土计算中等效附加应力法的改进[J]. *岩土力学*, 2007, **28**(增刊 1): 129-132. (JIE Yuxin, WANG Naidong, LI Guangxin. Improvement of equivalent additional stress method in reinforced soil calculation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(S1): 129-132. (in Chinese))
- [9] 王 非, 缪林昌. 落水洞上覆路堤土工加筋设计新方法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2009, **39**(6): 1217-1221. (WANG Fei, MIAO Linchang. New design method of geosynthetic-reinforced embankment over sinkholes[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2009, **39**(6): 1217-1221. (in Chinese))
- [10] GAO Y F, HANG L, HE J, et al. Pullout behavior of geosynthetic reinforcement in biocemented soils[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, **49**(3): 646-656.
- [11] 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 Jiaquan, LU Mengliang, ZHOU Yuefu, 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. (in Chinese))
- [12] ABDI M R, MIRZAEIFAR H, ASGARDUN Y, et al. Assessment of pegged geogrid (PG) pullout performance in coarse-grained soils using PIV analysis[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2024, **52**(1): 27-45.
- [13] WANG Z J, XIA Q S, YANG G Q, et al. Effects of transverse members on geogrid pullout behavior considering rigid and flexible top boundaries[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2023, **51**(4): 72-84.
- [14] GHAZAVI M, BAVANDPOURI O. Analytical solution for calculation of pull out force-deformation of geosynthetics reinforcing unsaturated soils[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, **50**(2): 357-369.
- [15] MALEKI A, LAJEVARDI S H, BRIANÇON L, et al. Experimental study on the L-shaped anchorage capacity of the geogrid by the pullout test[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, **49**(4): 1046-1057.
- [16] 中华人民共和国交通部. 公路工程土工合成材料试验规程: JTG E 50—2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test Methods of Geosynthetics for Highway Engineering: JTG E 50—2006[S]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))
- [17] 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): 142-148. (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): 142-148. (in Chinese))
- [18] 王家全, 祁航翔, 林志南, 等. 基于数字图像分析的土工合成材料加筋砂土拉拔试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, **43**(12): 3259-3269. (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): 3259-3269. (in Chinese))
- [19] 史旦达, 刘文白, 水伟厚, 等. 单、双向塑料土工格栅与不同填料界面作用特性对比试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(8): 2237-2244. (SHI Danda, LIU Wenbai, SHUI Weihou, et al. Comparative experimental studies of interface characteristics between uniaxial/biaxial plastic geogrids and different soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(8): 2237-2244. (in Chinese))