



固结度对复合土工排水网-废弃黏土 界面拉拔特性的影响

李升智,徐 辉,王璐楠,王锦楠

(浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018)

摘 要: 中国沿海沿江软土地区产生的废弃渣土主要为渗透性差、抗剪强度低的黏性土,采用排水筋材进行加筋回填时,深入认识固结度对复合土工排水网(Geocomposite drainage layer, GDL)-黏性土界面强度的影响规律是工程渣土堆填场稳定性分析的重要基础。以武汉某基坑开挖渣土和商品化 GDL 为试验材料,开展了 12 组固结-拉拔试验,分析了固结度对 GDL-黏土界面拉拔特性的影响规律。结果表明:界面拉拔曲线为应变软化型,固结度越大,达到峰值和残余拉拔力的位移也越大;随着固结度提高,界面峰值和残余摩擦角均呈增大趋势,而界面峰值和残余黏聚力变化不显著;随着拉拔位移的增大,GDL 拉应力逐渐由坡形分布转向均匀分布。当固结度从 0 增大至 90% 时,界面峰值和残余强度分别提高了 20.8%~111.1% 和 21.8%~101.7%,排水网芯的拉力承担比例则从 80.4%~81.8% 降低至 62.5%~63.4%。该研究有助于深入认识 GDL-黏土界面的相互作用机理,为废弃黏土堆填工程的稳定性分析提供依据。

关键词: 固结度;复合土工排水网;黏土;拉拔特性;界面强度

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2024)05-0407-11

引文格式: 李升智,徐辉,王璐楠,等. 固结度对复合土工排水网-废弃黏土界面拉拔特性的影响[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2024,51(3):407-417.

Reference Format: LI Shengzhi, XU Hui, WANG Lunan, et al. The effect of consolidation degree on the pull-out behavior of geocomposite drainage layer-abandoned clayed soil interface[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University,2024,51(3):407-417.

The effect of consolidation degree on the pull-out behavior of geocomposite drainage layer-abandoned clayed soil interface

LI Shengzhi, XU Hui, WANG Lunan, WANG Jiman

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The abandoned soils generated in coastal and riverine areas of China are dominated by cohesive soils with poor permeability and low shear strength. When reinforcing backfill with drainage reinforcement materials, a thorough knowledge of the effect of the consolidation degree on geocomposite drainage layer (GDL)-clayed soil interface strength is an important foundation for the stability analysis of excavated soil landfills. With representative excavated soil samples obtained from a foundation engineering site in Wuhan and commercialized GDL as the test materials, 12 sets of combined tests of consolidation and pull-out were conducted to investigate the effect of the consolidation degree on GDL-clayed soil interface pull-out characteristics. The results show that the pull-out curve is strain-softening, and the higher the consolidation degree, the further the displacement to reach peak and residual pullout force. Both interfacial peak and residual friction angle tend to increase with the enhancement of the consolidation degree, while the interfacial peak and residual cohesive force change insignificantly. With the increase of pullout

收稿日期:2023-12-11 网络出版日期:2024-03-13

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42172309)

作者简介:李升智(1997—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事环境土工方面的研究。

通信作者:徐 辉,E-mail: xuhui@zstu.edu.cn

displacement, the GDL tensile stress gradually switches from a slope-shaped distribution to a uniform distribution. As the consolidation degree increases from 0 to 90%, the interfacial peak and residual strength increase by 20.8%-111.1% and 21.8%-101.7%, respectively, while the proportion of drainage core tension decreases from 80.4%-81.8% to 62.5%-63.4%. This study contributes to an in-depth understanding of the interaction mechanism at the GDL-clay interface and provides a basis for the stability analysis of abandoned clayed soil landfills.

Key words: consolidation degree; geocomposite drainage layer; clayed soil; pull-out behavior; interfacial strength

0 引言

21世纪以来,随着中国城市地下空间的大规模开发利用,大量工程渣土也随之产生^[1-2]。据测算,目前中国每年产生的工程渣土已超过20亿吨^[3-4],并呈持续增加趋势。当前,中国工程渣土主要处理途径有简易堆填、渣土受纳场以及堆山造景。但是若堆填方式不当,易发生安全事故。例如,2015年12月,深圳光明新区红坳渣土受纳场堆体边坡失稳,约270万立方米的工程渣土发生滑动,造成77人死亡,直接经济损失达8.81亿元^[3,5]。中国软土地区产生的工程渣土存在黏粒含量高、含水率高、渗透性差、抗剪强度低等特点^[6]。在缺乏有效导排措施的堆填工程中,随着堆体不断增高,堆体内部逐渐饱和,排水固结进程迟缓,抗剪强度增长缓慢;当出现超高超速堆填时,容易达到临近破坏点而诱发堆体失稳灾害。如果在工程渣土堆体中分层铺设兼具良好排水和加筋功能的筋材,则有望同时提升工程渣土抗剪强度和筋土界面强度,从而显著提高工程渣土堆体的抗滑稳定性。

复合土工排水网(Geocomposite drainage layer, GDL)是一种由立体结构塑料网作为排水内芯、双面黏结土工布作为透水反滤层的复合土工材料。由于GDL兼具排水和加筋功能,因而被广泛应用于道路路基^[7-11]、填埋场顶部覆盖系统^[12-13]、填埋场渗滤液回灌系统^[14]、填埋场底部衬垫系统^[12]、渠道衬垫系统^[15]等。此外,由于GDL加筋结构能够适应不同类型的回填料,具有方便就地取材、价格低廉等优势,近年来逐渐被应用于加筋挡土墙、加筋土坡、加筋土堤等。Bhattacharjee等^[16]通过开展离心模型试验研究了降雨条件下不同加筋型式粉砂边坡的稳定性,结果表明:无加筋边坡水位显著上升且发生严重沉陷,最终导致失稳破坏;土工格栅加筋边坡发生大量变形,水位持续上升,格栅应变达到38%~48%;土工布加筋边坡水位有所降低,但由于加筋效果不足最终发生

失稳破坏;相比之下,GDL加筋边坡水位降低40%以上,坡顶和坡面变形减小80%以上,GDL应变仅为3%~8%,稳定性良好。Razeghi等^[17]通过开展离心模型试验和数值模拟分析研究了GDL对土工格栅加筋粉砂边坡稳定性的影响,结果表明:将土工格栅部分替换为GDL后,边坡水位明显下降,稳定性显著提高。对于GDL加筋结构,其稳定性往往受控于GDL与回填土之间的界面强度,因此深入认识GDL-黏性土界面强度特性具有重要意义。

目前,国内外关于GDL-黏性土界面强度特性的研究较少。Bacas等^[18]通过开展大型界面直剪试验,对比研究了排水复合土工材料-土界面与土工织物-土界面的强度特性,结果表明:土体抗剪强度越高,界面抗剪强度也越高,且排水复合土工材料-土界面强度较传统土工织物加筋的界面强度更大。Ferreira等^[19]通过开展一系列不同土体含水率和干密度的大规模界面拉拔试验,研究了土工复合加固材料加筋花岗岩残余土壤的拉拔行为,结果表明:密度是影响界面强度和界面破坏模式的关键因素,且当土壤处于中等密实状态时,含水率有显著的影响。Hamidzadeh等^[20]通过开展不同上覆应力下的大型拉拔试验研究了土工复合材料(SGCP)和组合格栅(CMB)加筋的拉拔行为,结果表明:上覆应力是增加界面强度的有效因素,且相较单层土壤,这两种加固方案对界面强度有明显的提升作用。Chao等^[21-22]采用自制的温控和应力控制大型直接剪切仪对GDL-黏性土界面开展了一系列快速加载和蠕变剪切试验,研究了环境荷载对黏性土-GDL界面力学特性的影响,结果表明:相比于原始试样,经受干燥-湿润循环、热循环和高温的界面具有较低的峰值剪切强度和抗蠕变剪切性能。目前,已有一些学者采用直剪试验研究了GDL-土体界面强度特性,但直剪试验模拟的是填土沿GDL表面发生滑移的单界面破坏行为,试验过程中整个界面剪切位移保持一致,故不能分析GDL拉伸特性对界面强度的影

响,无法模拟 GDL 从填土中拔出的双界面渐进破坏过程,因此需要开展界面拉拔试验以研究这种复杂的筋土界面相互作用机理。此外,黏性土的固结会提高土体抗剪强度^[23-27],而黏性土抗剪强度对界面强度的影响显著^[28]。随着固结度的提高,一方面土体被压实,土颗粒间的接触点增加,摩擦力和咬合力增大,同时含水量减少,土颗粒之间水化膜变薄,润滑作用减弱,在外力作用下移动的摩阻力增大,导致抗剪强度增大;另一方面土颗粒与 GDL 之间的摩擦和嵌固作用增强,使得界面摩擦强度增大。因此,研究固结度对拉拔荷载作用下 GDL-黏性土界面强度特性的影响规律具有重要意义。

综上所述,目前国内外针对 GDL-废弃黏土界面特性开展了较多直剪试验研究,但针对 GDL-废弃黏土界面拉拔特性的试验研究较为缺乏且不够深入。因此,本文从武汉某基坑开挖工程采集了废弃黏性土试样,开展了不同上覆应力和固结度条件下的黏性土与 GDL 的界面拉拔试验;基于试验结果,分析了固结度对 GDL-黏性土界面拉拔曲线和抗剪强度的影响;通过对 GDL 进行应变监测,进一步分析了固结度对 GDL 拉应力分布与传递的影响,为废弃黏土堆填场稳定性分析提供试验依据和理论基础。

1 试验仪器、材料和方法

1.1 试验仪器

拉拔试验在中国长江科学研究院研制的 TGH-3C 型土工合成材料直剪拉拔蠕变试验仪上进行,该仪器照片如图 1 所示。该仪器配有两个独立的加载系统,分别为水平加载系统和竖向加载系统,均由伺服电机驱动。竖向荷载加载系统最大载荷为 100 kN,精度 0.1%FS;水平荷载加载系统最大载荷为 100 kN,精度 0.1%FS,可实现 0.02~3.00 mm/min 范围内的应变控制式试验,水平位移范围为 0~150 mm,精度为 0.01 mm。剪切盒尺寸为长 600 mm、宽 300 mm、高 150 mm。试验过程由计算机自动采集数据,包括竖向荷载、竖向位移、拉拔位移、拉拔力等。

1.2 试验材料

试验所用工程渣土试样取自中国武汉万科皖子湖项目 K3 场地。土样外观为黑灰色,呈饱和、软流塑状态;粒径级配累计曲线如图 2 所示,不均匀系数

为 5.0,曲率系数为 0.51,细粒含量为 76.6%,属于级配不良的细粒土。工程渣土试样的物理力学参数如表 1 所示,其中:土样的液限为 43.32%,塑性指数为 18.2,可归类为低液限黏土;压缩系数为 0.39,属于中压缩性黏土;饱和渗透系数为 $1.85 \times 10^{-8} \sim 5.8 \times 10^{-6}$ cm/s,内摩擦角为 7.81° ,黏聚力为 11.32 kPa,属于低渗透低强度黏土。试验所用 GDL 产自山东建通工程科技有限公司,由排水网芯和土工布构成,其中:土工布作为滤层,以阻止土颗粒进入排水通道;排水网芯沿平面方向提供排水通道。在加筋土工程中,GDL 能够加速排水固结,提升土体抗剪强度;同时增大界面摩擦、黏结作用,提升筋土界面强度。其实物图与作用机理示意图如图 3 所示,基本技术指标如表 2 所示。

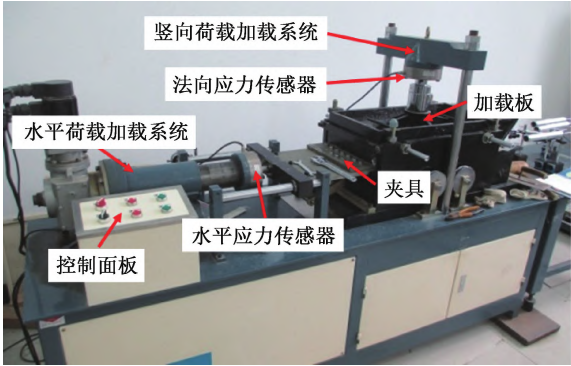


图 1 TGH-3C 型土工合成材料直剪拉拔蠕变试验仪照片

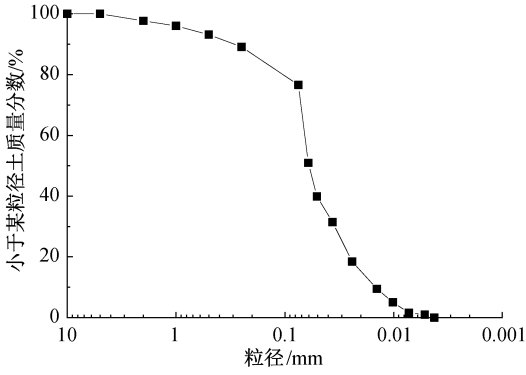


图 2 工程渣土试样的粒径级配累计曲线

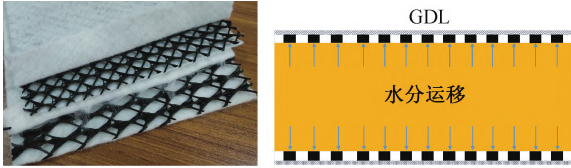


图 3 GDL 实物图及其作用机理示意图

表 1 工程渣土试样的物理力学参数

体积质量 G_s	天然密度 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水量 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	压缩系数 $\alpha_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	饱和渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	黏聚力 c/kPa
2.74	1.88	34.87	43.32	25.17	0.39	$1.85 \times 10^{-8} \sim 5.8 \times 10^{-6}$	7.81	11.32

表 2 复合土工排水网技术指标

指标	GDL	排水网芯	土工布
厚度/mm	8.0	6.0	1.6
抗拉强度/(kN·m ⁻¹)	≥18.5	≥10	≥10
剥离强度/(kN·m)	0.18		
纵向导水率/(m ² ·s ⁻¹)	3.0×10 ⁻⁴		
密度/(g·cm ⁻³)		0.94~0.96	
渗透系数/(cm·s ⁻¹)		≥3.5×10 ⁻³	9.9×10 ⁻³ ~1.0×10 ⁻¹
单位面积质量/(g·m ⁻²)			200
峰值伸长率/%	40~80	20~30	40~80
压缩屈服应变/%	48	24	72

1.3 试验流程

1.3.1 试验工况

本文共设计了 3 组固结-拉拔试验,工况如表 3 所示,每组试验包括 4 种不同固结度工况,即固结度 U 分别为 0、30%、60%、90%。试验组 CP1、CP2 和 CP3 分别用于研究 50、100 kPa 和 150 kPa 上覆应力作用下不同固结状态黏土与 GDL 界面拉拔曲线的变化规律。在此基础上,分析固结度对 GDL-黏土界面拉拔曲线和抗剪强度以及 GDL 拉应力分布与传递的影响。

表 3 固结-拉拔试验工况

试样编号	上覆应力 P_s /kPa	固结度 U /%
CP1-1~CP1-4	50	0, 30, 60, 90
CP2-1~CP2-4	100	0, 30, 60, 90
CP3-1~CP3-4	150	0, 30, 60, 90

1.3.2 试验步骤

在试验准备阶段,按如图 4 所示的监测点布置方案,分别对 GDL 的土工布和排水网芯进行应变片粘贴,以获得界面拉拔试验过程中筋材拉力的变化规律。土工布应变片的粘贴采用文献[29]的方法,以柔性的 703 胶作为黏合剂,其延展性好,刚度远低于土工布,可与土工布协同变形,粘贴时保证接触面为圆形,控制胶层直径 35 mm、厚度 3 mm 左右;排水网芯应变片的粘贴采用文献[30-32]的方法,以环氧树脂胶作为黏合剂,并在应变片上用 703 胶覆盖,大小与厚度同上,以形成保护层。剪切盒内填土采用质量-体积控制法:控制初始干密度为 1.41 g/cm³,初始含水率为 35%,以 5 cm 厚度分 6 层填筑完成,并逐层用刮平板整平。

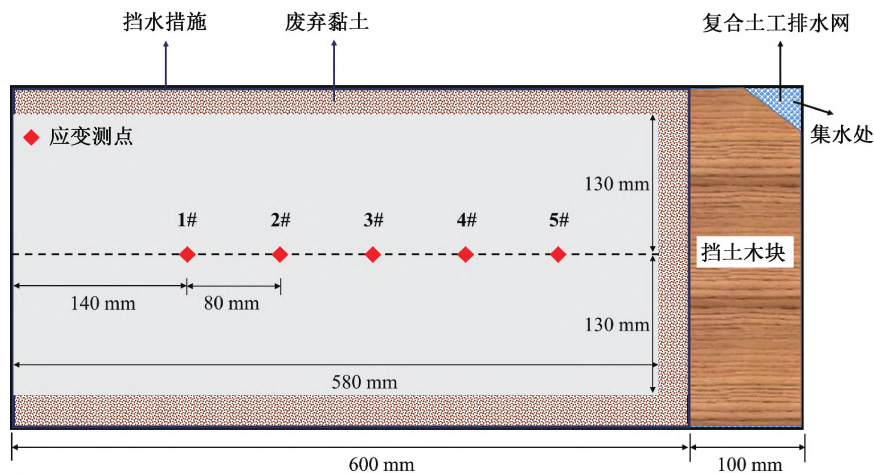


图 4 GDL 应变测点布置示意图

试验过程分为固结和拉拔两个阶段。固结阶段时,根据试验设计工况施加竖向加载压力,以模拟工程渣土快速超速堆填,使土样固结直到达到目标固结度对应沉降值(沉降值已通过固结试验进行计算并减去 GDL 压缩变形量),期间数据采集仪每隔 5 s 自动采集垂直位移、垂直压力,并记录固结时间。固结阶段结束后立即进入拉拔阶段。以

1.00 mm/min 的水平拉拔速率开展拉拔试验。期间数据采集系统每隔 10 s 采集水平拉力、水平位移、垂直压力、垂直位移、GDL 应变,其中所采集的水平拉力为拉拔端所受拉力,即拉拔力,与 GDL 被拔出须克服的阻力方向相反、大小相等。当水平拉力基本稳定不变时,停止试验。试验现场照片如图 5 所示。

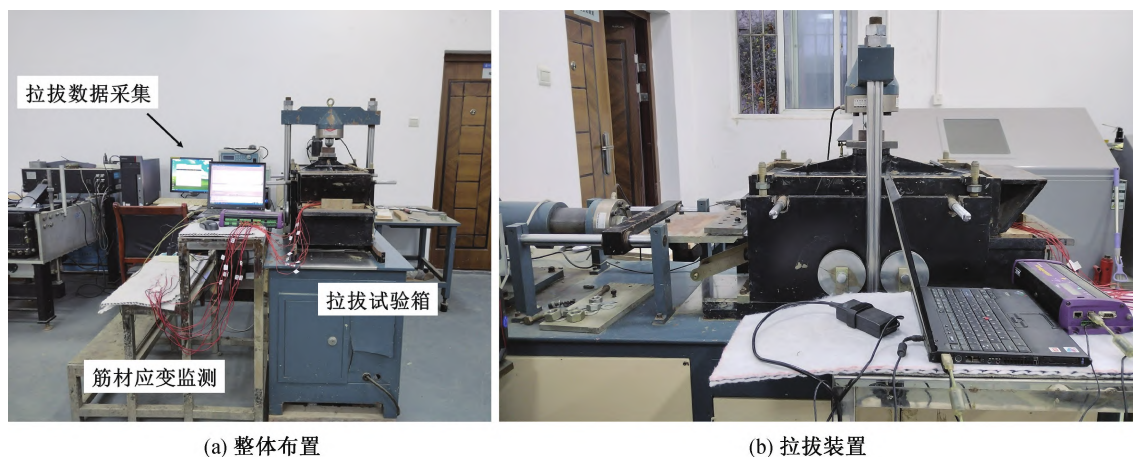


图5 固结-拉拔试验现场照片

1.4 数据处理

使用式(1)和式(2)计算各试样所受到的上覆应力和剪应力:

$$\sigma = P/A \quad (1)$$

$$\tau = T/(2A) \quad (2)$$

其中: σ 为上覆应力,kPa; τ 为剪应力,kPa; T 为拉拔力,kN; A 为GDL与土的接触面积, m^2 。

使用式(3)计算不同工况的固结度:

$$U = S_t/S_0 \times 100\% \quad (3)$$

其中: S_t 为土体经过时间 t 所产生的沉降量,mm; S_0 为土体的最终沉降量,mm。

2 结果与讨论

2.1 固结度对GDL-黏土界面拉拔曲线的影响

不同固结度的黏土与GDL界面的拉拔力-拉拔位移曲线如图6所示。随着拉拔位移的增加,拉拔力逐渐增大,到达峰值后开始下降,最后趋于稳定,表现为应变软化特性,这与Tajabadipour等^[33]与黄文彬等^[34]在进行土工布拉拔试验时发现的现象类似。试验中采用的GDL上下层皆为土工布,直接与黏土相接触,因此GDL的抗拔力主要取决于土工布与黏土之间的相互作用力。在上覆应力 P_s 作用下,土体干密度逐渐增大,从而GDL-黏土抗拔力逐渐增大;由于GDL中部分土工布受压后内嵌入排水网芯孔隙中,导致表面存在很多小凹坑,在拉拔过程中,GDL周围的土颗粒位置不断发生翻滚、错动和调整,从而表现出明显的剪胀性,故出现应变软化现象。在相同上覆应力条件下,随着固结度的提高,峰值和残余拉拔力均呈增大趋势。例如,在上覆应力50 kPa作用下,当固结度分别为0、30%、60%和90%时,峰值拉拔力分别为3.88、4.69、5.85、6.26 kN,残余拉拔

力分别为3.17、3.86、4.81、5.19 kN。

在相同固结度下,随着上覆应力 P_s 的增大,峰值和残余拉拔力也增大。例如,在固结度为30%的条件下,当上覆应力分别为50、100、150 kPa时,峰值拉拔力分别为4.69、7.03、9.62 kN,残余拉拔力分别为3.86、5.71、7.92 kN。同时,上覆应力 P_s 越大,达到峰值和残余拉拔力对应的拉拔位移均越大。例如,在固结度为30%的条件下,当上覆应力分别为50、100、150 kPa时,达到峰值拉拔力对应的拉拔位移分别为107.01、108.84、113.84 mm,达到残余拉拔力对应的拉拔位移分别为133.84、143.68、145.01 mm。在相同上覆应力条件下,随着固结度的提高,达到峰值和残余拉拔力对应的拉拔位移逐渐增大。例如,在上覆应力 $P_s=100$ kPa的条件下,当固结度从0提高到90%时,达到峰值和残余拉拔力对应的拉拔位移分别增加了5.84 mm和7.84 mm。这是因为黏土的固结度越高,密实度就越大,从而限制了GDL周围的土颗粒发生翻滚、错动和调整,GDL-黏土界面剪缩性越大,而剪胀性越小,达到最大剪缩(胀)量所需的拉拔位移就越大。相关研究表明,拉拔力达到峰值或残余值时,筋土界面剪缩或剪胀效应也刚好最大^[35-36],这与本文的试验结果一致。

2.2 固结度对GDL-黏土界面抗剪强度的影响

不同上覆应力作用下GDL-黏性土界面摩擦强度随固结度的变化曲线如图7所示。在同一上覆应力作用下,随着固结度的增大,界面峰值和残余强度均呈现增长趋势。例如,在50 kPa上覆应力作用下,当固结度分别为0、30%、60%和90%时,相应的界面峰值强度分别为12.20、14.74、18.39、19.69 kPa,界面残余强度分别为9.97、12.14、

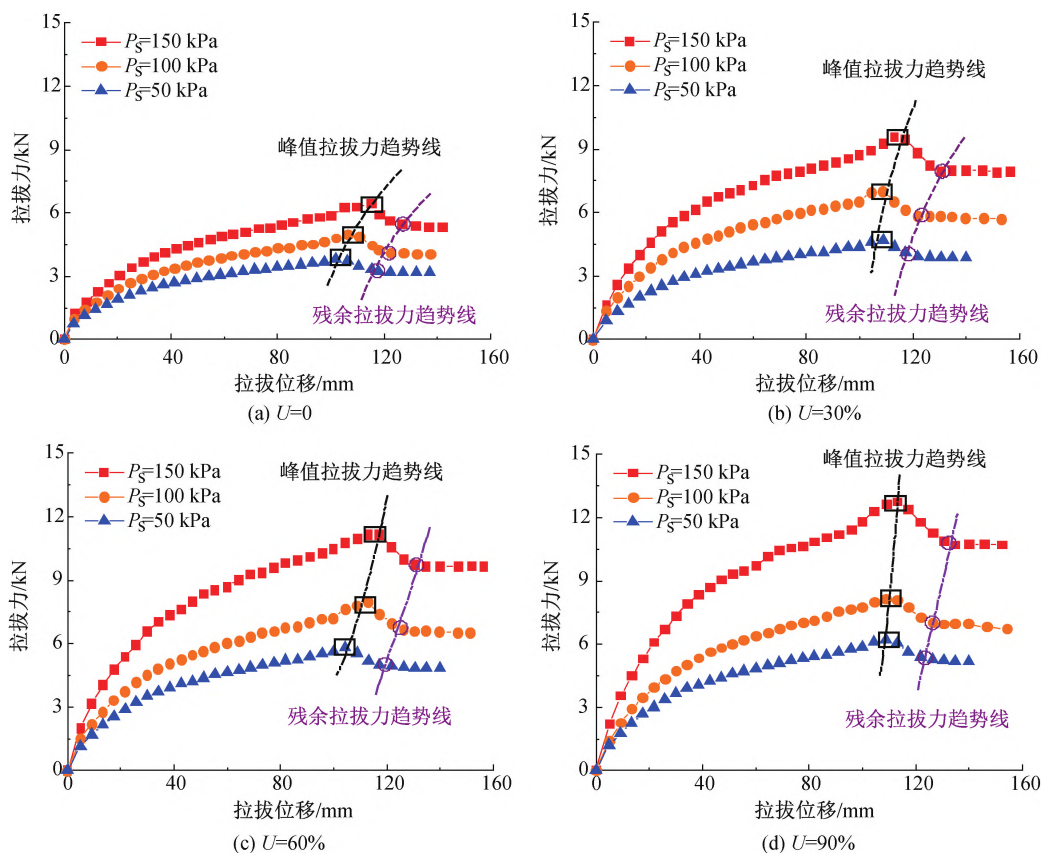


图6 不同固结度的黏土与 GDL 界面的拉拔力-拉拔位移曲线

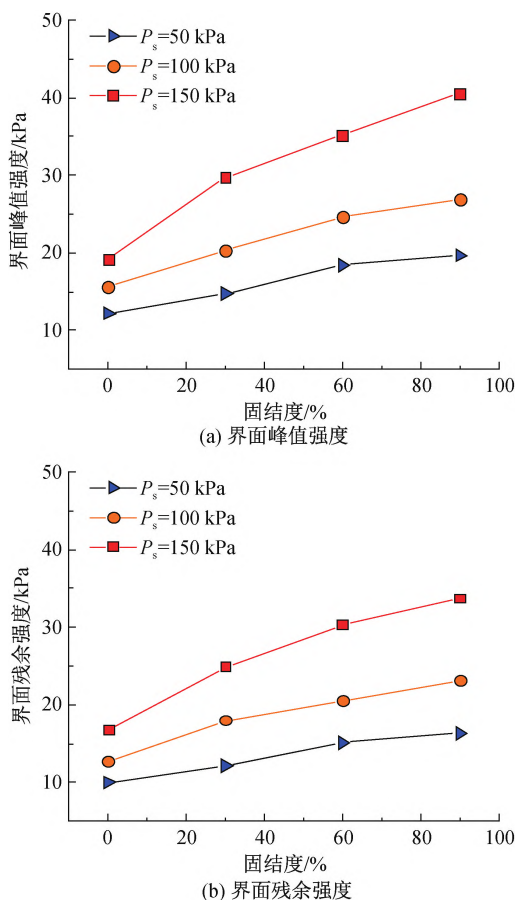


图7 GDL-黏土界面强度随固结度的变化曲线

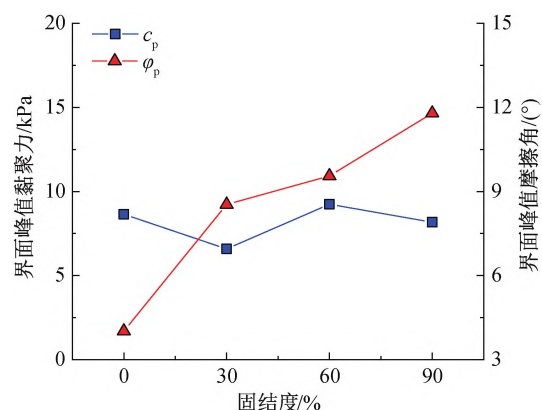
15.13、16.32 kPa。这是因为随着固结度的提高,土体更加密实,土颗粒间的接触点增加,摩擦力和咬合力增大,同时含水量减少,土颗粒之间水化膜变薄,润滑作用减弱,表现为土体抗剪强度增大,从而土颗粒受外力作用发生移动时所受到的阻力也就变大;土颗粒与 GDL 之间的摩擦与嵌固作用随固结度的提高而增强,故界面峰值和残余强度增大。试验过程中, GDL 中部分土工布受压后内嵌入排水网芯孔隙中,导致表面存在很多小凹坑,因此在拉拔过程中, GDL 周围的土颗粒会不断发生翻滚、错动和调整。随着固结度的增大,土颗粒受拉拔荷载作用发生移动所需克服的阻力也就变大,从而限制了 GDL 周围的土颗粒发生翻滚、错动和调整,导致 GDL-黏土界面强度进一步增大。此外,在同一固结度下,随着上覆应力的增大,界面峰值和残余强度均增大。例如,在固结度为 30% 的条件下,当荷载分别为 50、100、150 kPa 时,界面峰值强度分别为 14.74、20.27、29.75 kPa,界面残余强度则分别为 12.14、17.95、24.89 kPa。这是因为上覆应力越大,达到相同固结度时土体的干密度也越大,因而界面峰值和残余强度就越大。在三种上覆应力作用下,界面峰值和残余强度随固结度提高的增长幅度分别为

20.8%~111.1%和21.8%~101.7%。

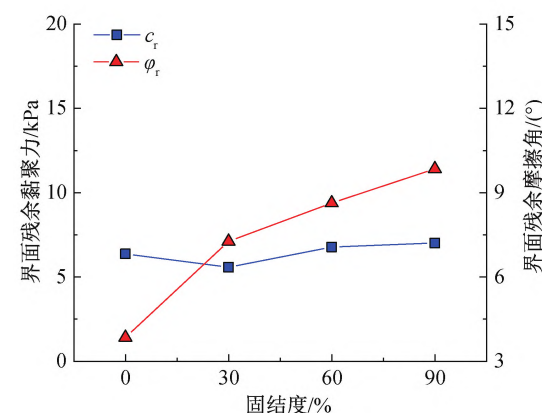
利用摩尔-库伦强度准则对图7数据点进行拟合,得到的界面峰值和残余强度参数如图8所示。随着固结度的提高,界面峰值和残余摩擦角均呈现增大趋势。例如,当固结度分别从0提高至90%时,界面峰值摩擦角从4.02°增大至11.79°,界面残余摩擦角从3.85°增大至9.85°。这是因为固结度越大,土体更加密实,土颗粒与GDL之间的摩擦和嵌固作用增强,界面摩擦角随之增大。此外,随着固结度的提高,与界面峰值和残余摩擦角增大幅度相比,界面峰值和残余黏聚力的变化并不显著,实际变化量仅为0.47~2.06 kPa,固结引起的最大变化幅度小于30%。这是因为固结度的提高对GDL与土颗粒之间胶结作用力的影响不显著,导致界面峰值和残余黏聚力变化幅度不大。由此可知,黏土固结过程对GDL-黏土界面强度的影响主要来源于界面摩擦强度。当固结度从0分别提升至30%、60%和90%时,界面峰值摩擦角的增幅分别为112.35%、137.65%、193.38%,界面残余摩擦角的增幅分别为88.73%、124.20%、155.80%。

2.3 固结度对GDL拉应力分布和传递的影响

以150 kPa上覆应力条件下固结-拉拔试验GDL上所布监测点测试结果为例,分析固结度对GDL应力分布与传递的影响规律。图9为4种固结度下GDL中排水网芯和土工布各测点拉应力与拉拔位移的关系,应力包括排水网芯拉应力和土工布拉应力,其中: X 为测点到拉拔侧剪切盒壁的距离,mm; L 为GDL加筋长度,mm。在相同固结度下,随着拉拔位移的增加,排水网芯和土工布的拉应力均逐渐增大。在距离拉拔端相同位置处,随着固结度的提高,排水网芯和土工布的拉应力均呈增大趋势。这是因为GDL整体拉拔力由排水网芯和土工布共同承担。此外,在相同条件下,土工布的拉应



(a) 界面峰值强度参数

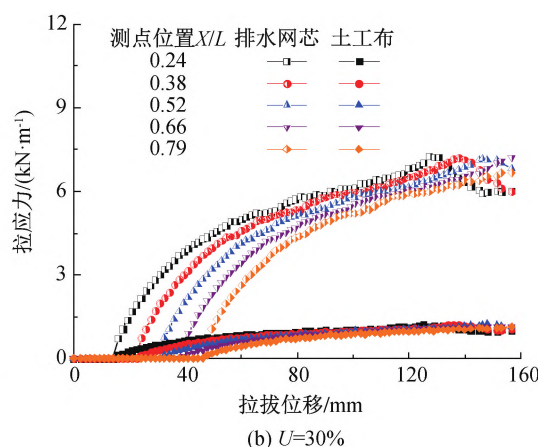
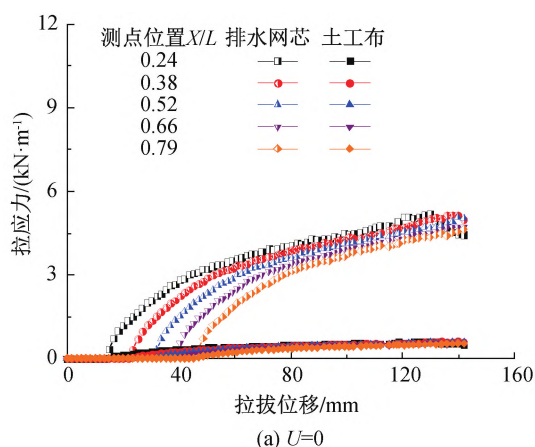


(b) 界面残余强度参数

图8 固结度与GDL-黏土界面强度参数的关系曲线

力要显著低于排水网芯。造成这种现象的主要原因是排水网芯的拉伸模量要远高于土工布。

图10为不同拉拔位移对应的GDL中排水网芯和土工布的拉应力分布曲线。在某一拉拔位移时(拉拔过程中的某时刻),距离拉拔端越远,排水网芯和土工布拉应力就越小,即拉应力从拉拔端向自由端不断衰减。黏土的固结度越大,这种拉应力衰减现象就越明显。例如,在拉拔位移为40 mm的条件下,当固结度从0提高至90%时,排水网芯拉应力衰减量(从 $X/L = 0.24$ 到 $X/L = 0.79$)从



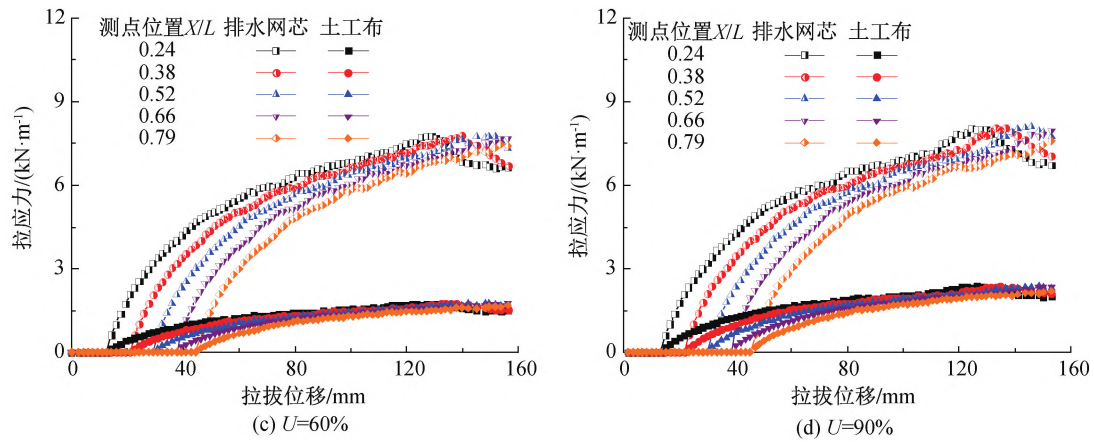


图9 不同固结度下 GDL 中排水网芯和土工布各测点拉应力随拉拔过程的变化曲线

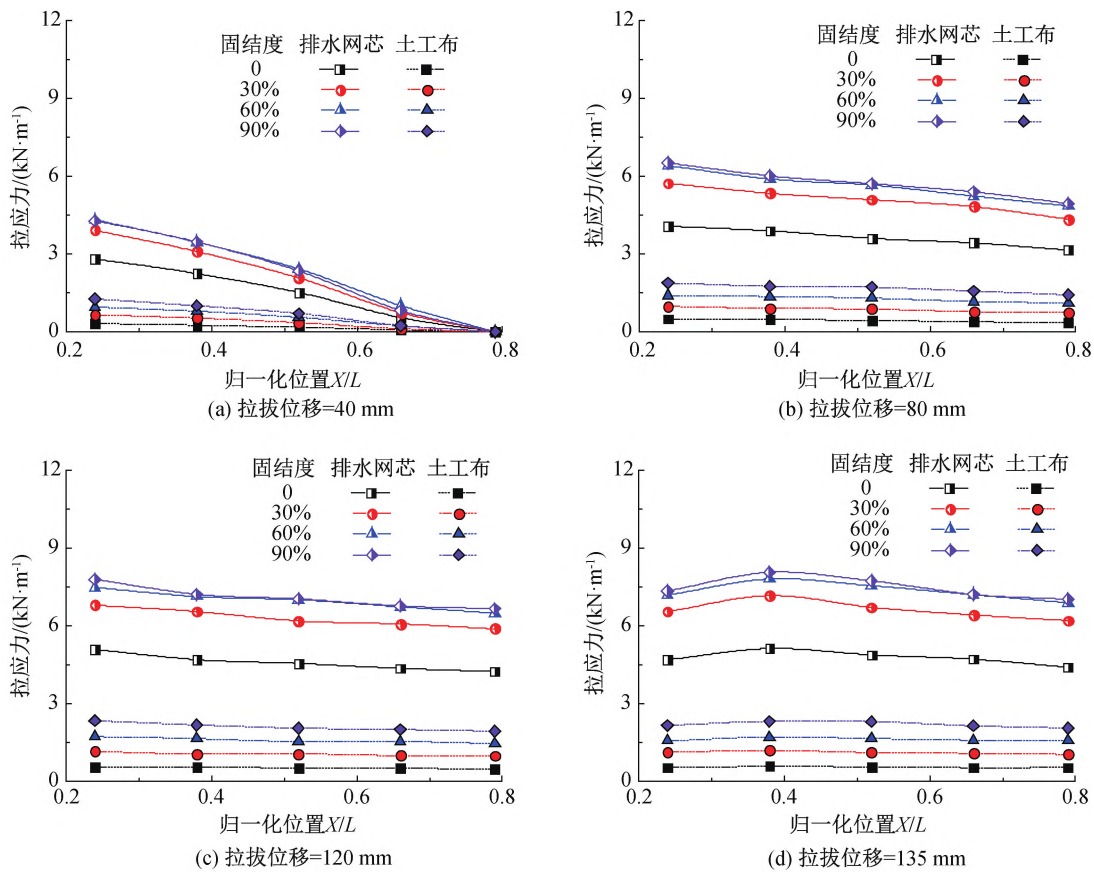


图10 不同拉拔阶段 GDL 中排水网芯和土工布的拉应力分布曲线

2.81 kN/m 增大至 4.29 kN/m,土工布拉应力衰减量从 0.31 kN/m 增大至 1.27 kN/m。随着拉拔位移的增大,拉拔力逐步传递至整个界面,从而导致拉应力衰减现象逐渐减弱,拉应力由坡形分布逐渐转向均匀分布。此时,黏土固结度对拉应力衰减现象的影响也逐渐减弱。例如,在拉拔位移为 135 mm 条件下,当固结度从 0 提高至 90%时,排水网芯拉应力衰减量从 0.29 kN/m 增大至 0.32 kN/m,土工布拉应力衰减量从 0.02 kN/m 增大至 0.10 kN/m。

图 11 为 4 种固结度下 $X/L = 0.24$ 位置处

GDL 中排水网芯和土工布的拉力承担比例。从图 11 中可以看出,在相同固结度条件下,随着 GDL 拉拔过程中拉拔力的不断增大,排水网芯和土工布的拉力承担比例基本保持不变。此外,随着固结度的提高,土工布的拉力承担比例逐渐增大,而排水网芯的拉力承担比例则相应减小。例如,当固结度为 0 时,排水网芯和土工布的拉力承担比例分别为 80.4%~81.8%和 18.2%~19.6%;当固结度为 90%时,土工布的拉力承担比例增大至 36.6%~37.5%,而排水网芯的拉力承担比例则减小至

62.5%~63.4%。这是因为 GDL 中排水网芯和土工布之间紧密贴合,在拉拔过程中两者变形协调,即变形量基本一致;由于排水网芯的拉伸模量显著高于土工布,因此在发生相同变形量时,排水网

芯承担了更多的拉拔力。随着固结度的提高,土工布受压后内嵌入排水网芯孔隙的深度不断增大,从而土工布变形量增大,最终导致表现的拉力承担比例增大。

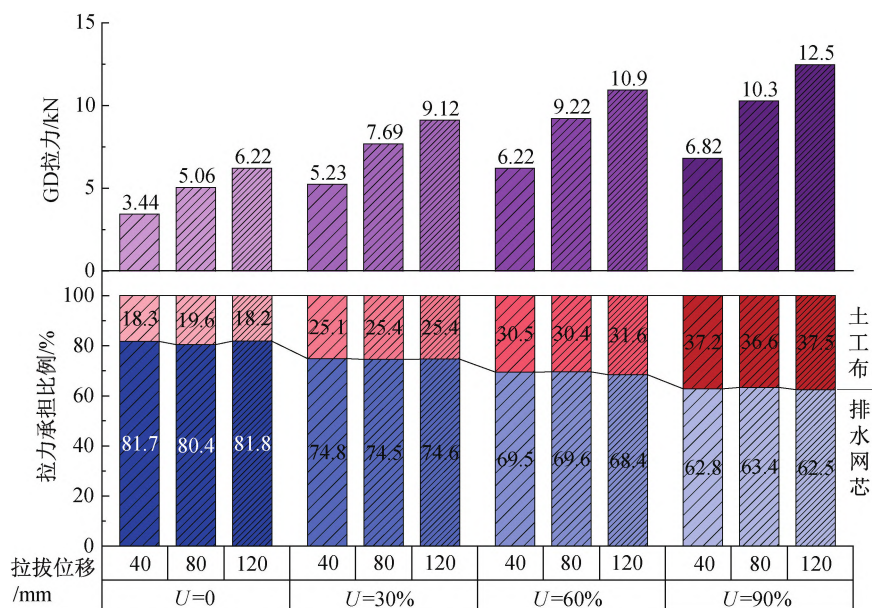


图 11 不同固结度下 GDL 中排水网芯和土工布的拉力承担比例($X/L=0.24$)

3 结 论

本文开展了 12 组 GDL 与黏土的固结-拉拔试验,分析了固结度对 GDL-黏土界面拉拔曲线和抗剪强度的影响规律,探究了固结度对 GDL 中土工布和排水网芯的拉应力分布与传递规律的影响,主要得到了以下结论:

a)GDL-黏土界面拉拔力-拉拔位移曲线呈现典型的应变软化特征。在相同上覆应力作用下,随着黏土固结度的提高,达到界面峰值和残余拉拔力对应的拉拔位移逐渐增大。这是因为黏土固结度越大,密实度就越大,因而界面剪缩性越大,而剪胀性越小,故达到最大剪缩(胀)量所需的拉拔位移就越大。

b)随着黏土固结度的提高,界面峰值和残余强度均呈增长趋势,界面峰值和残余摩擦角也均呈现增大趋势,而界面峰值和残余黏聚力的变化不显著。这是因为黏土固结度的增大,能够增强土颗粒与 GDL 之间的摩擦和嵌固作用,但对胶结作用影响不显著。

c)随着黏土固结度的提高,排水网芯和土工布的拉应力均呈增大趋势。排水网芯和土工布拉应力从拉拔端向自由端不断衰减,且随着黏土固结度增大而更加明显。随着拉拔位移的增加,拉应力由坡

形分布逐渐转向均匀分布,黏土固结度对拉应力衰减现象的影响逐渐减弱。

d)黏土固结度相同时,随着 GDL 拉拔过程中拉拔力不断增大,排水网芯和土工布的拉力承担比例基本保持不变。当黏土固结度从 0 提高至 90% 时,土工布的拉力承担比例从 18.2%~19.6% 增大至 36.6%~37.5%,排水网芯的拉力承担比例则从 80.4%~81.8% 降低至 62.5%~63.4%。

参考文献:

- [1] Shang C, Zhu Y, Zhang Z. A glance at the world[J]. Waste Management, 2013,33(2): 489-492.
- [2] Kataguir K, Boscov M E G, Teixeira C E, et al. Characterization flowchart for assessing the potential reuse of excavation soils in Sao Paulo city[J]. Journal of Cleaner Production, 2019,240: 118215.
- [3] Zhan L T, Zhang Z, Chen Y M, et al. The 2015 Shenzhen catastrophic landslide in a construction waste dump: Reconstitution of dump structure and failure mechanisms via geotechnical investigations [J]. Engineering Geology, 2018, 238: 15-26.
- [4] 贾谨铭,任福民,胡舒馨,等. 我国主要城市群建筑垃圾区域性污染风险分析[J]. 环境工程, 2023, 41(2): 98-105.
- [5] Yin Y P, Li B, Wang W P, et al. Mechanism of the

- december 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization [J]. *Engineering*, 2016, 2 (2): 230-249.
- [6] 杨龙, 姚文敏, 曾江波, 等. 堆填分层与降雨入渗条件下渣土边坡稳定性研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(10): 175-181.
- [7] Stormont J C, Henry K S, Pease R E. Draining unsaturated soils with geosynthetics[J]. *Geosynthetics International*, 2010, 17(5): 332-343.
- [8] Bahador M, Evans T M, Gabr M A. Modeling effect of geocomposite drainage layers on moisture distribution and plastic deformation of road sections[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(9): 1407-1418.
- [9] Bilodeau J P, Doré G, Savoie C. Laboratory evaluation of flexible pavement structures containing geocomposite drainage layers using light weight deflectometer [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(2): 162-170.
- [10] Li C, Ashlock J, White D, et al. Permeability and stiffness assessment of paved and unpaved roads with geocomposite drainage layers [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(7): 718.
- [11] Saride S, Huchegowda B K, Vyas S. Evaluation of drainage coefficients for 2D and 3D-geocomposite embedded subbase layers [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, 50(6): 1110-1119.
- [12] Narejo D. Finite element analysis experiments on landfill cover drainage with geosynthetic drainage layer [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 38: 68-72.
- [13] Othman M, Frost M, Dixon N. Stability performance and interface shear strength of geocomposite drain/soil systems[C]//International Conference on Engineering and Technology(IntCET 2017). Putrajaya, Malaysia. AIP Conference Proceedings, 2018,1930(1): 020049.
- [14] Khire M V, Haydar M M. Leachate recirculation in bioreactor landfills using geocomposite drainage material [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(2): 166-174.
- [15] Khosravi A A, Rahimi H, Eskandari G H. Performance of geocomposite and granular drains under irrigation canal linings[J]. *Geosynthetics International*, 2011, 18(1): 48-55.
- [16] Bhattacharjee D, Viswanadham B V S. Effect of geocomposite layers on slope stability under rainfall condition[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2018, 48 (2): 316-326.
- [17] Razeghi H R, Viswanadham B V S, Mamaghanian J. Centrifuge and numerical model studies on the behaviour of geogrid reinforced soil walls with marginal backfills with and without geocomposite layers [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, 47 (5): 671-684.
- [18] Bacas B M, Cañizal J, Konietzky H. Frictional behaviour of three critical geosynthetic interfaces[J]. *Geosynthetics International*, 2015, 22(5): 355-365.
- [19] Ferreira F B, Vieira C S, de Lurdes Lopes M. Pullout behavior of different geosynthetics-influence of soil density and moisture content [J]. *Frontiers in Built Environment*, 2020, 6: 12.
- [20] Hamidzadeh M, Moayed R Z. Investigating static pullout behavior of two geocomposite reinforcements embedded in one-layer and two-layer soils [J]. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2022, 8(3): 35.
- [21] Chao Z M, Fowmes G. Modified stress and temperature-controlled direct shear apparatus on soil-geosynthetics interfaces [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(3): 825-841.
- [22] Chao Z M, Fowmes G. The short-term and creep mechanical behaviour of clayey soil-geocomposite drainage layer interfaces subjected to environmental loadings[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, 50 (2): 238-248.
- [23] Sills G C, Wheeler S J, Thomas S D, et al. Behaviour of offshore soils containing gas bubbles [J]. *Géotechnique*, 1991, 41(2): 227-241.
- [24] Grozic J L H, Nadim F, Kvalstad T J. On the undrained shear strength of gassy clays[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(7): 483-490.
- [25] Hong Y, Wang L Z, Ng C W W, et al. Effect of initial pore pressure on undrained shear behaviour of fine-grained gassy soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(11): 1592-1600.
- [26] Gao Z W, Hong Y, Wang L Z. Constitutive modelling of fine-grained gassy soil: A composite approach[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2020, 44(9): 1350-1368.
- [27] Hong Y, Wang L Z, Zhang J F, et al. 3D elastoplastic model for fine-grained gassy soil considering the gas-dependent yield surface shape and stress-dilatancy[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2020, 146 (5): 04020037.
- [28] 王协群, 张俊峰, 邹维列, 等. 格栅-土界面抗剪强度模型及其影响因素[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(4): 133-141.
- [29] 陈凌伟, 周小文, 彭卫平, 等. 土工布应变的测量方法研

- 究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(3): 70-74.
- [30] 彭卫平, 陈凌伟, 刘伟, 等. 模型土工格栅应变测量方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(7): 942-946.
- [31] 俞松波, 沈明荣, 陈建峰, 等. 离心模型试验中土工格栅拉力测量[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2295-2301.
- [32] 陈建峰, 俞松波, 叶铁锋, 等. 软土地基加筋石灰土路堤离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 287-293.
- [33] Tajabadipour M, Khaleghi M, Portelinha F H M. The use of scrap tire strips to improve the pullout behavior of geotextiles[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2023, 9(5): 65.
- [34] 黄文彬, 陈晓平. 土工织物与吹填土界面作用特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2831-2837.
- [35] 曹文昭, 郑俊杰, 周燕君, 等. 三向土工格栅变形及筋土界面特性试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 840-846.
- [36] 曹文昭, 郑俊杰, 周燕君. 双向和三向土工格栅筋土界面特性对比试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(1): 109-116.

(责任编辑: 康 锋)