

恒法向刚度下土 - 复合土工膜界面剪切特性研究

庄 策¹, 王舒琪², 刘博洋¹, 何鹏飞^{3*}

¹兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州

²郑州财经学院艺术设计学院, 河南 郑州

³兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年4月1日; 录用日期: 2025年4月11日; 发布日期: 2025年6月10日

摘 要

在实际工程中, 复合土工合成材料因其出色的力学性能和广泛的应用场景而得到日益广泛的应用。在常见的恒法向应力边界条件上进行改进, 选取更能体现实际工况的恒法向刚度边界条件, 从温度、含水率、法向应力、法向刚度方向研究土 - 复合土工膜界面的力学特性对全方位把握其界面有重要意义。结果表明, 温度对界面剪切强度影响较大, 含水率对界面的影响与温度密切相关。法向应力在常温和负温下界面剪切应力的增长速率较为稳定, 而随着法向刚度的增大界面剪切强度也增大, 且随着温度降低变化量也增大。

关键词

恒法向刚度, 界面直剪试验, 冻土, 复合土工膜

Study on Interface Shear Characteristics of Soil-Composite Geomembrane under Constant Normal Stiffness

Ce Zhuang¹, Shuqi Wang², Boyang Liu¹, Pengfei He^{3*}

¹School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

²School of Art and Design, Zhengzhou University of Finance and Economics, Zhengzhou Henan

³School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 1st, 2025; accepted: Apr. 11th, 2025; published: Jun. 10th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 庄策, 王舒琪, 刘博洋, 何鹏飞. 恒法向刚度下土-复合土工膜界面剪切特性研究[J]. 力学研究, 2025, 14(2): 86-96. DOI: 10.12677/ijm.2025.142009

Abstract

Composite geosynthetic materials are more and more used in practical engineering because of their excellent mechanical properties and wide application scenarios. By improving the common constant normal stress boundary conditions and selecting the constant normal stiffness boundary conditions that can better reflect the actual working conditions, it is of great significance to study the mechanical characteristics of the soil-composite geomembrane interface from the directions of temperature, water content, normal stress and normal stiffness. Results show that the influence of surface temperature on interfacial shear strength was great, and the influence of water content on interfacial shear strength is closely related to temperature. The growth rate of interfacial shear stress at normal temperature and negative temperature is relatively stable, and the interfacial shear strength also increases with the increase of normal stiffness, and the change amount also increases with the decrease in temperature.

Keywords

Constant Normal Stiffness, Interface Direct Shear Test, Frozen Soil, Composite Geomembrane

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土工织物(GTX)和土工膜(GMB)是最常见的土工合成材料,它们通常一起用于有色金属冶炼池、城市固体废物填埋场和水道等项目的屏障系统[1]-[3];高密度聚乙烯(HDPE) GMB 由于其极低的渗透性而通常用作不可渗透层的主要材料,压实粘土衬垫或土工合成粘土衬垫(GCL)可与 GMB 组合以形成更有效的复合衬垫系统[4]-[7]。无论 GTX 是作为一个独立的保护层还是作为 GCL 的一部分, GTX 和 GMB 之间都将直接接触。因此, GMB/GTX 界面的剪切强度是边坡稳定性的关键因素[8]。GMB/GTX 界面剪切特性的试验研究始于 20 世纪 80 年代,其剪切特性(例如,样本大小、剪切速率、水合状态和法向应力)和材料特性(例如,聚合物类型、纹理技术和织物)会影响测试结果[9] [10]。

土 - 结构界面在岩土工程中起着关键作用。在基础建设中,如桩和锚,结构元件与周围土壤之间的相互作用至关重要[11] [12]。直接界面剪切试验已被广泛用于研究土 - 结构界面的剪切行为,包括表面粗糙度、土壤密度、含水量、颗粒棱角性、结构材料的性质和荷载的性质(单调或循环)、以及确定土壤和结构材料之间的界面剪切行为中起着关键作用[13]-[15]。例如, Samanta 等人[16]进行了一系列直接剪切试验,以研究表面粗糙度的影响,砂的平均粒径(d_{50})和相对密度对土与钢或混凝土表面之间界面处的剪切行为的影响。DeJong 等人[17]指出,密度较高的砂倾向于表现出较高的界面强度,法向应力的增加倾向于限制砂的膨胀。

为了了解土 - 土工合成材料界面的剪切强度,可以使用经过适当修改的直剪试验装置。许多先前的研究者已经修改了直剪装置来研究土 - 土工合成材料界面的相互作用行为[18] [19]。砂 - 土工合成材料界面的应力 - 应变响应受土壤颗粒形态和级配、密度、有效应力和接触表面的表面特性的影响[20] [21]。土工织物具有纹理表面,导致膨胀界面剪切响应,而土工膜具有光滑表面,由于相互作用机制的不同,土 - 土工合成材料在膨胀和非膨胀界面上的剪切行为是完全不同的[22]。在膨胀界面上,砂粒和配合面材料

表面粗糙体之间的互锁提供了剪切阻力[23],然而,在非膨胀界面的情况下,控制机制是滚动、滑动和犁削[24]。

本文通过界面剪切试验,在含水率、温度、法向应力、法向刚度在粉质粘土和复合土工膜界面进行了一系列直剪试验,分析研究了土-复合土工膜界面力学特性的影响。并对常用的恒法向应力直剪系统进行了改造,通过增加底部弹簧的方式以达到恒法向刚度边界条件的目的。通过分析峰值剪切应力的_{大小},界面粘聚力和摩擦角的变化判断出危险界面的破坏载荷,为实际工程安全提供了有力的支持。

2. 试验流程

2.1. 试验材料

复合土工膜(GM)是一种由土工布和土工膜通过特定工艺复合而成的高强度材料,本试验选取的复合土工布为一布一膜土工膜,该土工膜由一层土工布加一层土工膜构成(图 1)。复合土工布广泛应用于水利、堤坝、筑路、建筑、环保工程中,可起到过滤、排水、隔离、防护、加筋等作用,且由于其优异的性能和广泛的应用,已经成为现代工程中不可或缺的材料。依据复合土工布执行标准(GB/T17638-2017)测量了基本力学特性,如表 1 所示。

Table 1. Basic mechanical properties of geomembrane
表 1. 土工膜的基本力学性质

单位面积 质量(g/m ²)	厚度 (mm)	断裂强力 (KN/m)	断裂伸长率 (%)	CBR 顶破 强力(KN)	等效孔径 (mm)	垂直渗透系数 (cm/s)	撕破强力 (KN)
400	3.0	12.5	25~100	2.1	0.07~0.2	KX (10 ⁻⁹ ~10 ⁻¹²), K = 1.0~9.9	0.33

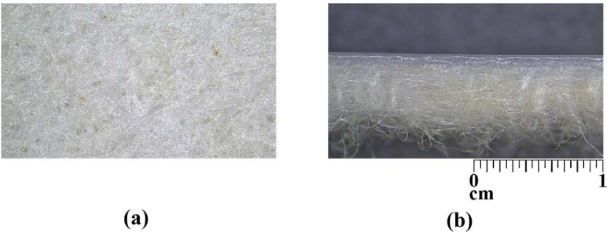


Figure 1. Microschematic diagram of two cloth and one membrane geomembrane
图 1. 两布一膜土工膜细观示意图

本试验土样取自甘肃省兰州市某地,属于季节冻土区,平均冻深约 0.94 m~1.08 m。试验土的物理力学属性是研究土体与结构界面力学行为的基础。因此,通过液塑限联合测定试验、颗粒分析试验、击实试验等基本土工试验对土样的物理指标进行了测定对试验土的关键物理力学参数进行了系统测量(表 2)。包括:初始含水率(w₀)、颗粒级配曲线、液限(WL)和塑限(WP)、内摩擦角(φ)、粘聚力(c)、最优含水率(w_{0pt})以及最大干密度(ρ_{dmax}),这些参数为后续界面力学特性的研究提供了必要的材料特性基础数据。

Table 2. Basic physical and mechanical properties of silty clay
表 2. 粉质粘土的基本物理力学性质

土样类型	初始含水率	最优含水率	液限	塑限	最大干密度(g/cm ³)
粉质粘土	1.7%	13.3%	28.5	14.7	1.93



Figure 2. GZS-1 high frequency vibrating screen
图 2. GZS-1 型高频振筛机

根据土工试验标准规范 GB/T50123-2019, 采用通过筛析法获得土样的颗粒分布曲线, 试验仪器采用 GZS1 型高频振筛机, 标准筛孔径分别为 2 mm、1.5 mm、1.25 mm、1 mm、0.75 mm、0.5 mm、0.315 mm、0.25 mm、0.16 mm、0.1 mm、0.075 mm、0.05 mm、0.0375 mm、0.025 mm (图 2)。筛析法是一种用于测定颗粒物料粒度分布的实验方法, 广泛应用于土壤、砂石、粉末等颗粒材料的分析。筛析法通过一系列不同孔径的标准筛, 将颗粒物料按大小分级。筛子按孔径从大到小叠放, 物料经过筛分后, 各筛上残留的颗粒重量即为该粒径范围的分布情况。通过筛析法得到的粒径级配曲线如图 3 所示。

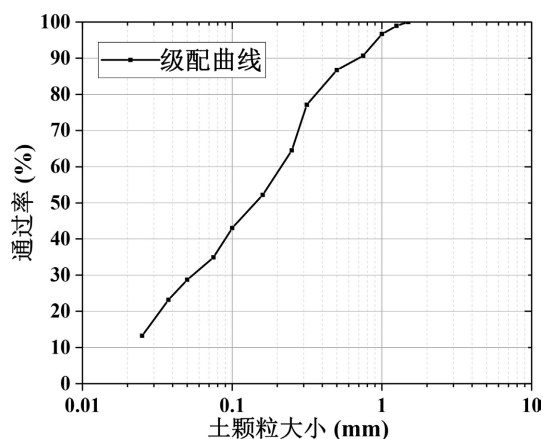


Figure 3. Grain size grading curve of silty clay
图 3. 粉质粘土粒径级配曲线

2.2. 实验流程

2.2.1. 试验装置

要进行土-复合土工膜界面直剪试验(SGI)所用的直剪仪如图 4 所示, 主要包括剪切盒、加载装置、法向刚度弹簧等部分组成。直剪仪上、下剪切盒内部有效尺寸均为 100 mm × 100 mm × 25 mm, 与 SGI 样品中土体部分尺寸相同, 这样在剪切过程中 SGI 界面刚好与上、下剪切盒界面重合。加载装置由高精度步进电机控制, 可通过 PC 自动记录剪切过程位移和应力变化。法向刚度弹簧安装在砝码下侧, 通过调节弹簧刚度系数, 可以计算得到加载于 SGI 样品界面的法向刚度。

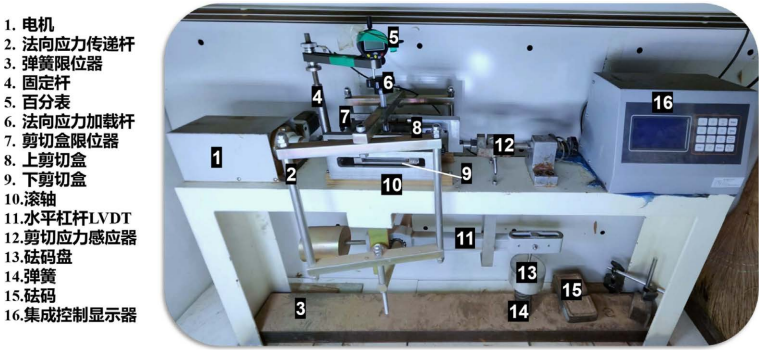


Figure 4. Test device diagram
图 4. 试验装置示意图

剪切盒侧面增加了可视窗口(图 5(a)), 通过工业相机、微距镜头和 LED 光源等图像采集系统可以连续记录剪切过程中界面的图像。在剪切过程中上剪切盒保持不动, 下剪切盒向右移动, 保持上剪切盒可视窗始终不动, 能够更好地记录剪切过程中试样土颗粒的运动轨迹。土样中心为确保试验过程中温度的控制精度, 直剪仪安装在 $2\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 1.8$ 的恒温箱中, 控温精度在 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。恒温箱置于大型恒温室中(如图 5(b)所示), 尺寸为 $5\text{ m} \times 2.8\text{ m} \times 2.8\text{ m}$, 控温精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。两级温度控制措施保证在试验过程中试样和环境温度达到一致。

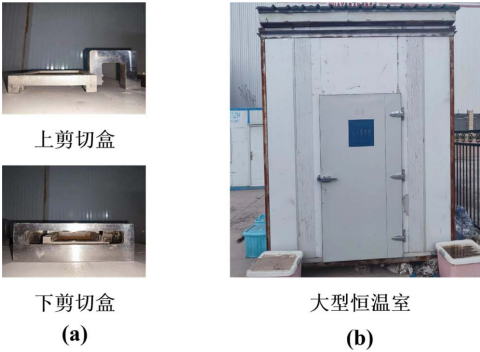


Figure 5. Shear box can be window with large constant greenhouse
图 5. 剪切盒可视窗与大型恒温室

2.2.2. 试验过程

已有大量实验表明恒法向刚度(CNS)边界条件相较于传统直剪试验中的恒法向应力(CNL)边界条件, 更接近土与结构物相互作用时的实际工况, 这是模拟在实际剪切过程中周围土体的刚度本身的刚度。试验条件包括不同的法向刚度、法向应力、试验温度和土体含水率。试验中的法向刚度分别为 100、300、500 和 600 kPa/mm, 这四种刚度符合实际工况中的刚度条件。初始法向应力分别为 40、80、120 和 160 kPa, 按照最优含水率 13.3%将土体含水率分别设置为 10%、13%、16%和 19%。制样过程中由于水分蒸发等因素影响, 含水率有很小的波动, 但变化范围很小, 分析时仍然按照设定含水率表示。试验温度分别为 20°C 、 -2°C 、 -5°C 和 -8°C , 剪切速率设定为 0.8 mm/min 的快剪, 最终剪切位移为 12 mm。剪切过程中的图像采集时间间隔为 6 s, 相机拍照的间隔时间与图像采集相同。实验数据由图 4 中的集成控制显示器统一传输到电脑中, 试验结束后对剪切后的土工布界面拍照, 重复此过程进行下一组试验。

3. 试验结论

3.1. 20℃下剪切应力 - 剪切位移变化曲线

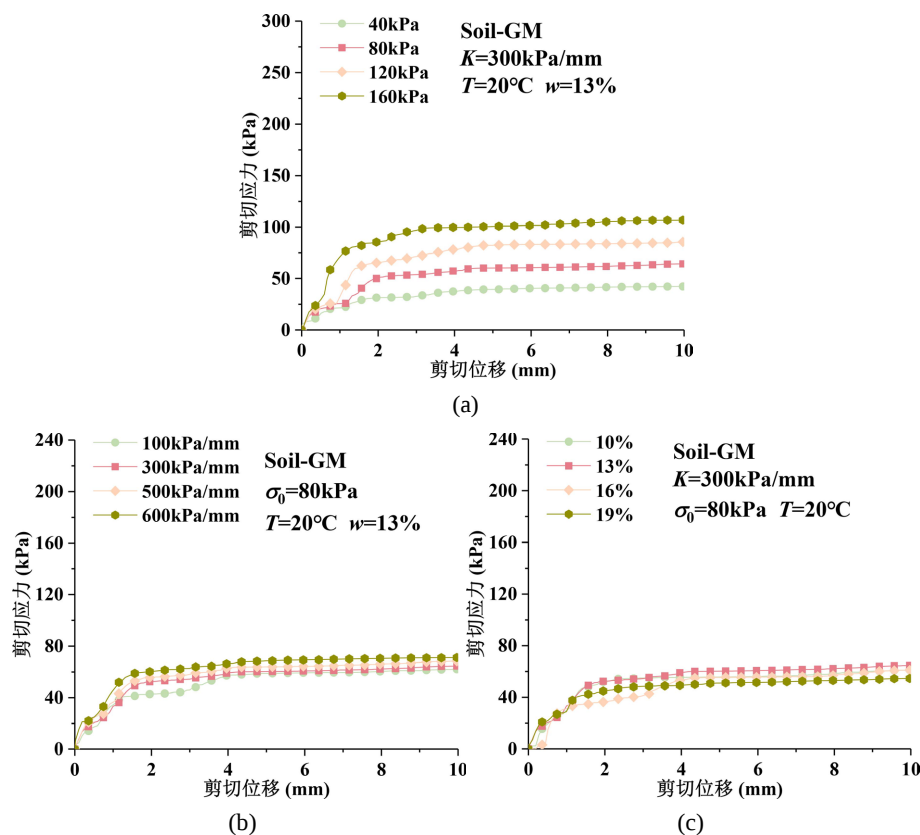


Figure 6. SGI interfacial shear stress-shear displacement curve at 20°C

图 6. 20℃下 SGI 界面剪切应力 - 剪切位移变化曲线

图 6(a)为不同初始法向应力对 SGI 界面剪切应力 - 剪切位移曲线的影响(含水率 13%，温度 20℃，法向刚度为 300 kPa/mm)。可以看出，在不同初始法向应力状态下，曲线均呈现应变硬化的趋势，且随着初始法向应力的增加，SGI 的剪切强度增加较为明显。这是由于初始法向应力的增加，不仅会使土 - 复合土工布之间的界面摩擦力增加，还改变了土壤内部的应力分布。图 7 中剪切后界面产生的现象可以说明这一点，随着初始法向应力的增大，土工膜界面出现更多的颗粒划痕，且剪切后依然粘接在复合土工膜界面的土样增多。界面剪应力在初始(剪切位移约为 0~1 mm)时快速增大，因为这时复合土工膜与土体界面接触状态完整，以界面的弹性变形为主。随后达到平衡后剪切应力的增长速率逐渐减小直到稳定，此时复合土工布界面已被剪开，界面的剪切应力主要由土样与复合土工膜间的摩擦力来提供。初始法向应力由 40 kPa 提升到 160 kPa 的过程中，相邻两个初始法向应力之间对应的界面剪切应力变化量相差不大，分别为 21.8、21.5、21.6 kPa。说明初始法向应力对 SGI 界面剪切应力的增加是较为稳定的，初始法向应力的增加量与界面剪切应力增加量成正比。

由图 6(b)可以看出，SGI 界面剪切应力随刚度的增大而增大，产生这种现象的原因是由于法向刚度越大，试样在产生剪胀时受到来自法向约束就越强，从而产生更大的剪切应力。但这种变化量并不明显，刚度从 100 kPa/mm 增加到 600 kPa/mm，对应的剪切应力的变化量为 2.2、3.8、2.7 kPa，原因在于复合土工膜表面较为光滑，通过法向约束产生的反力对 SGI 界面摩擦力的增长有限。图 6(c)为不同图样含水率

对 SGI 界面剪切应力 - 剪切位移曲线的影响, 各试验条件如图所示。随着含水率的增大, 界面剪切应力表现出先增大后减小的趋势, 在 13% 含水率时达到最大值, 19% 含水率时对应的界面剪切应力最小。由于 13% 含水率更接近土样的最优含水率, 在该含水率下 SGI 界面粘聚力达到最大, 则产生更大的界面剪切强度。19% 含水率时土体中有大量的自由水, 在施加法向压力后土体颗粒中的水分子会移动到界面上, 增多的水分子对 SGI 界面有润滑作用, 降低了土 - 复合土工膜的界面摩擦力。

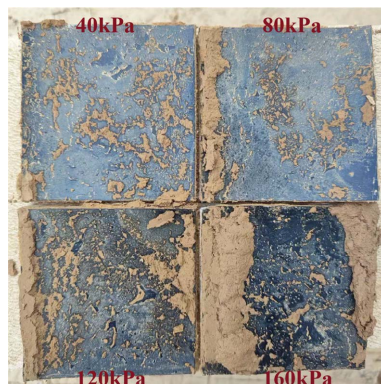


Figure 7. Diagram of SGI interface after shearing under different initial normal stresses

图 7. 不同初始法向应力下 SGI 界面剪切后示意图

3.2. -5℃下剪切应力 - 剪切位移变化曲线

图 8 为 -5℃ 下法向应力 - 剪切位移随初始法向应力、法向刚度、土样含水率的变化曲线, 与常温下的表现不同均为软化曲线。-5℃ 下初始法向对界面剪切应力的影响趋势与常温相同(图 8(a)), 均为随着初始法向应力的增大界面剪切应力也增大。这是由于在负温时冰胶结力的影响, 随着温度由正转负, 界面胶结冰含量增多从而提升了界面剪切强度。在 -5℃ 时初始法向应力带来的界面剪切应力的变化量相差较大, 随着初始法向应力的增大, 对应的峰值粘聚力变化量和残余粘聚力变化量分别 43.6、25.8、28.4 kPa 和 50.8、43.9、36.9 kPa, 但整体呈减小的趋势。随着初始法向应力的增大, 达到界面峰值剪切应力的剪切位移越大, 这是由于初始法向应力的增大使界面摩擦力也增大, 界面被剪断就需要更大的剪切应力。

图 8(b) 展示了 -5℃ 下不同法向刚度对剪切应力的影响, 随着法向刚度的增大, 界面峰值剪切应力与残余剪切应力均增大, 且相邻刚度间剪切应力的变化量较常温时有很大提升。此时 -5℃ 下土样由于冰胶结力的影响整体性更强, 由法向刚度产生的法向应力增量难以挤压土体的内部空隙, 法向应力增量被抵消的量减小了。与常温时不同(图 7(c)), 随着含水率的增大界面剪切应力也增大(图 8(c)), 这与胶结冰的含量增多有关, 负温情况下含水率越高界面冰胶结力越大, 从而产生更大的界面剪切应力。可以看出随着含水率的增大, 达到峰值剪切应力的剪切位移逐渐提前。这是由于复合土工膜表面较为光滑, 与土样中的胶结冰粘结后, 含水率越高越容易发生脆性破坏。且由于含水率越高产生的胶结冰也就越高, 所以越高的含水率也会产生越高的界面峰值剪切应力和残余剪切应力。

3.3. 不同温度下法向位移 - 剪切位移变化曲线

图 9 为不同温度下法向位移 - 剪切位移关系(含水率 13%, 法向刚度 300 kPa/mm, 初始法向应力 80 kPa)。可以看到, 在负温下随着温度的降低法向位移逐渐增大, 但法向位移的变化量变化较小, 这是因为法向刚度对界面法向位移有约束作用。可以发现, 20℃ 时产生的法向位移介于 -8℃ 与 -5℃ 之间, 产生这种现象的原因与界面法向位移的产生原因有关。在剪切过程中靠近复合土工膜界面的土颗粒在法向应力

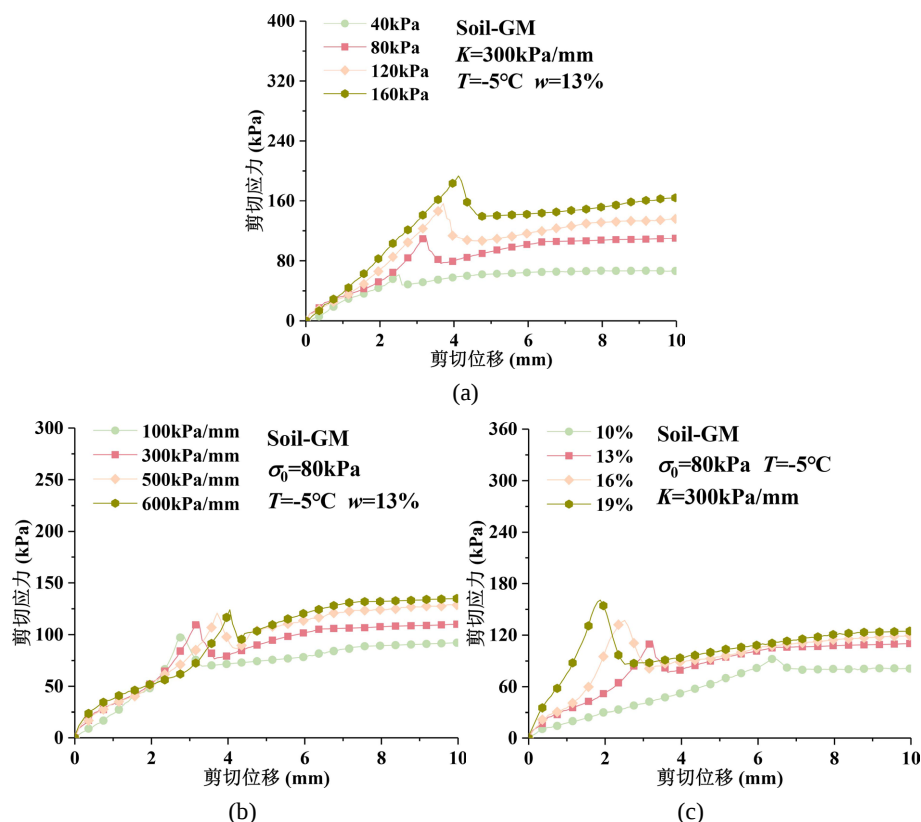


Figure 8. SGI interfacial shear stress-shear displacement curve at -5°C
 图 8. -5°C 下 SGI 界面剪切应力 - 剪切位移变化曲线

和剪切应力的作用下破碎重组，与 0.8 mm/min 的快剪试验速度造成了试样的剪胀，而剪缩主要是由于剪切过程中压缩了土颗粒间的空隙。在常温时由于土颗粒间的粘结力较低，有大量土颗粒发生破碎重组，从而造就了其较高的法向位移。而当温度由正转负，土颗粒间开始出现胶结冰使土样的整体性更强，但相反的界面上进行破碎重组的土颗粒则越少。当温度为 -2°C 、 -5°C 时冰胶结力较弱，由土颗粒破碎重组产生的剪胀位移和压缩土体空隙的剪缩位移之和小于 20°C 时的和。而在 -8°C 时土颗粒间胶结冰增多使其大于 20°C 时的最终和值，表现出更大的法向位移。

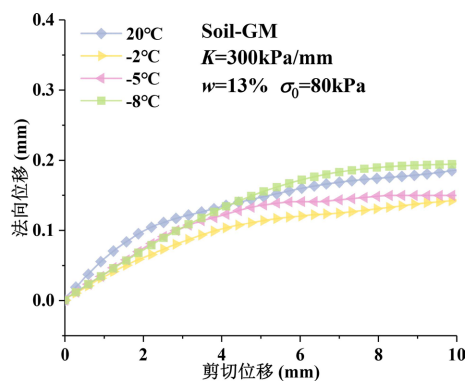


Figure 9. Change curves of SGI interface normal displacement-shear displacement at different temperatures
 图 9. 不同温度下 SGI 界面法向位移 - 剪切位移变化曲线

3.4. 不同温度下 SGI 界面强度包线

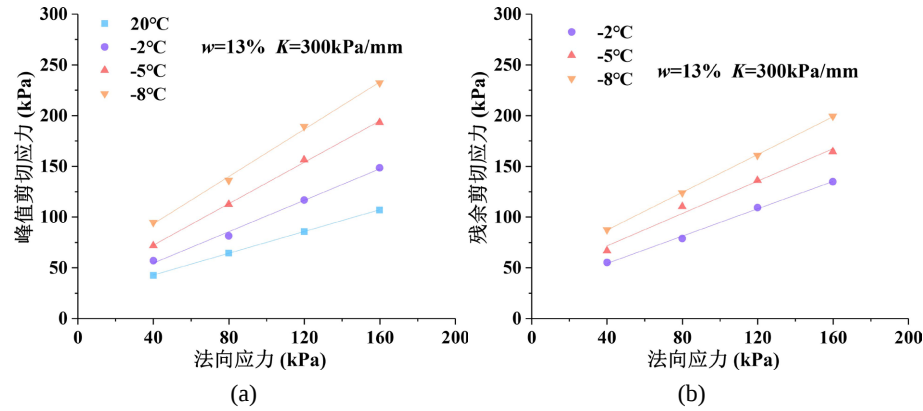


Figure 10. SGI interface strength envelope at different temperatures

图 10. 不同温度下 SGI 界面强度包线

图 10(a)是不同温度下的峰值剪切强度随初始法向应力变化规律。可以看到，温度和初始法向应力对峰值强度有显著的影响，随着温度的降低和初始法向应力的增加，峰值剪切强度迅速增加。-8℃时的峰值剪切强度是 20℃时的近 2 倍。这是因为土壤中有大量自由水，随着温度的降低，自由水会逐渐变成胶结结冰，增强了界面的胶结作用，提高界面的峰值剪切强度。常温时 SGI 界面剪切应力 - 剪切位移曲线为硬化曲线，所以不同温度下残余剪切的强度如图 10(b)所示。与峰值剪切应力的变化规律相同，残余剪切应力随着温度的降低也增大，随着初始法向应力的增大而增大。

Table 3. SGI interface strength parameters at different temperatures

表 3. 不同温度 SGI 界面强度参数

含水率 (%)	法向刚度 (kPa/mm)	温度(℃)	峰值粘聚力(kPa)	残余粘聚力(kPa)	峰值摩擦角(°)	残余摩擦角(°)
13	300	20	21.15		28.22	
		-2	23.35	27.1	37.77	33.98
		-5	31.2	39.5	45.62	38.59
		-8	46.46	49.7	49.38	42.97

两种剪切应力对应的界面粘聚力和摩擦角如表 3，可以看到，在同一法向刚度与含水率时，峰值粘聚力和残余粘聚力随着温度的降低均增大。相同温度下残余粘聚力略大于峰值粘聚力，这与常见的土 - 结构界面的峰值粘聚力与残余粘聚力的大小相反。推测是由于复合土工膜表面较为光滑，试样在剪切过程中颗粒重新排列后，可能形成更稳定的结构，使残余粘聚力增加。相同温度下的峰值摩擦角均大于残余摩擦角，这与常见情况相同，常见于各种应变软化曲线中。

4. 结论

土的力学性质由多种因素共同决定，土与结构的接触面常常在实际工程中被认为是危险破坏面，而复合土工布作为现在已有广泛的使用，所以研究土 - 复合土工布界面的力学性质是决定工程稳定性的关键。本文在温度、含水率、法向应力、法向刚度四个条件下进行了一系列冻土 - 复合土工布界面直剪试验，得到如下结论：

在常温条件下,不同初始法向应力状态下,材料表现出应变硬化的特征;而在负温条件下,材料则呈现应变软化的趋势。随着初始法向应力的增加,剪切强度显著提升。刚度对界面剪切应力的影响相对较小,但在常温和负温下,界面剪切应力均随法向刚度的增加而增大。常温下,界面剪切强度在土样含水率为13%时达到最大值;而在负温条件下,含水率越高,界面剪切强度越大,且随着温度的降低,剪切强度逐渐增加。

在负温条件下,随着温度的降低,法向位移逐渐增大,但其变化幅度较小。值得注意的是,存在一个特定的负温状态,其法向位移与20℃时的最大法向位移相同。

温度和初始法向应力对峰值强度有显著影响。随着温度的降低和初始法向应力的增加,峰值剪切强度和残余剪切强度均迅速增加。在相同的法向刚度和含水率条件下,峰值粘聚力和残余粘聚力均随温度的降低而增大。此外,相同温度下,残余粘聚力略高于峰值粘聚力,而峰值摩擦角则大于残余摩擦角。

参考文献

- [1] Touze-Foltz, N., Bannour, H., Barral, C. and Stoltz, G. (2016) A Review of the Performance of Geosynthetics for Environmental Protection. *Geotextiles and Geomembranes*, **44**, 656-672. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.05.008>
- [2] Rowe, R.K. and Yu, Y. (2019) Magnitude and Significance of Tensile Strains in Geomembrane Landfill Liners. *Geotextiles and Geomembranes*, **47**, 439-458. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.01.001>
- [3] Chou, Y., Brachman, R.W.I. and Rowe, R.K. (2022) Leakage through a Hole in a Geomembrane beneath a Fine-Grained Tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, **59**, 372-383. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0289>
- [4] Eid, H.T. (2011) Shear Strength of Geosynthetic Composite Systems for Design of Landfill Liner and Cover Slopes. *Geotextiles and Geomembranes*, **29**, 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2010.11.005>
- [5] Li, L., Fall, M. and Fang, K. (2020) Shear Behavior at Interface between Compacted Clay Liner-Geomembrane under Freeze-Thaw Cycles. *Cold Regions Science and Technology*, **172**, Article 103006. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103006>
- [6] Lin, H., Huang, W., Wang, L. and Liu, Z. (2023) Transport of Organic Contaminants in Composite Vertical Cut-Off Wall with Defective HDPE Geomembrane. *Polymers*, **15**, Article 3031. <https://doi.org/10.3390/polym15143031>
- [7] Eldesouky, H.M.G., Thiel, R. and Brachman, R.W.I. (2023) Assessment of Geomembrane Strain from Pond Liner Bubbles. *Geotextiles and Geomembranes*, **51**, 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2023.07.002>
- [8] Yu, Y. and Rowe, R.K. (2020) Geosynthetic Liner Integrity and Stability Analysis for a Waste Containment Facility with a Preferential Slip Plane within the Liner System. *Geotextiles and Geomembranes*, **48**, 634-646. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.03.008>
- [9] Samanta, M., Bhowmik, R. and Khanderi, H. (2022) Laboratory Evaluation of Dynamic Shear Response of Sand-Geomembrane Interface. *Geosynthetics International*, **29**, 99-112. <https://doi.org/10.1680/jgein.21.00016a>
- [10] Zhang, Z., Fang, L., Zhao, Q., Zhang, M., Pan, Y. and Ma, B. (2022) An Experimental Evaluation of Pile-Anchor Strengthening Mechanics for Existing Tunnels in Landslide Region. *Underground Space*, **7**, 199-218. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.07.005>
- [11] Dhadse, G.D., Ramtekkar, G.D. and Bhatt, G. (2021) Finite Element Modeling of Soil Structure Interaction System with Interface: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, **28**, 3415-3432. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09505-2>
- [12] Hu, L. and Pu, J. (2004) Testing and Modeling of Soil-Structure Interface. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**, 851-860. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2004\)130:8\(851\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:8(851))
- [13] Isaev, O.N. and Sharafutdinov, R.F. (2020) Soil Shear Strength at the Structure Interface. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **57**, 139-146. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09649-0>
- [14] Zheng, J., He, H. and Alimohammadi, H. (2021) Three-Dimensional Wadell Roundness for Particle Angularity Characterization of Granular Soils. *Acta Geotechnica*, **16**, 133-149. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01004-9>
- [15] Janipour, A.K., Mousivand, M. and Bayat, M. (2022) Study of Interface Shear Strength between Sand and Concrete. *Arabian Journal of Geosciences*, **15**, Article No. 172. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09394-0>
- [16] Samanta, M., Punetha, P. and Sharma, M. (2018) Influence of Surface Texture on Sand-Steel Interface Strength Response. *Géotechnique Letters*, **8**, 40-48. <https://doi.org/10.1680/jgele.17.00135>
- [17] DeJong, J.T. and Westgate, Z.J. (2009) Role of Initial State, Material Properties, and Confinement Condition on Local

-
- and Global Soil-Structure Interface Behavior. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**, 1646-1660. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2009\)135:11\(1646\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2009)135:11(1646))
- [18] Afzali-Nejad, A., Lashkari, A. and Shourijeh, P.T. (2017) Influence of Particle Shape on the Shear Strength and Dilation of Sand-Woven Geotextile Interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, **45**, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.07.005>
- [19] Vangla, P. and Gali, M.L. (2016) Shear Behavior of Sand-Smooth Geomembrane Interfaces through Micro-Topographical Analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, **44**, 592-603. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.04.001>
- [20] David Frost, J., Kim, D. and Lee, S. (2012) Microscale Geomembrane-Granular Material Interactions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **16**, 79-92. <https://doi.org/10.1007/s12205-012-1476-x>
- [21] Pillai, A.G. and Gali, M.L. (2022) Role of Particle Shape on the Shear Strength of Sand-GCL Interfaces under Dry and Wet Conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, **50**, 262-281. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.11.004>
- [22] Guo, Y., Lin, C., Leng, W. and Zhang, X. (2022) Laboratory Evaluation of Different Geosynthetics for Water Drainage. *Geosynthetics International*, **29**, 254-269. <https://doi.org/10.1680/jgein.21.00005>
- [23] Indraratna, B., Biabani, M.M. and Nimbalkar, S. (2015) Behavior of Geocell-Reinforced Subballast Subjected to Cyclic Loading in Plane-Strain Condition. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **141**, 1-16. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001199](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001199)
- [24] Dove, J.E. and Frost, J.D. (1999) Peak Friction Behavior of Smooth Geomembrane-Particle Interfaces. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**, 544-555. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1999\)125:7\(544\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1999)125:7(544))