

DOI: 10.11779/CJGE20240430

正负温条件下土工袋-渠坡膨胀土界面剪切特性对比分析

田金博¹, 张勇敢^{1,2,3}, 鲁洋^{*1,3}, 刘斯宏^{1,3,4}, 刘瑾^{2,4}, 武猛²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 3. 河海大学大坝长效特性及环保修复技术中西联合实验室, 江苏 南京 210024; 4. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 土工袋因其优良的工程性能被应用于寒区膨胀土渠道边坡的冻害防治, 而土工袋-渠坡膨胀土界面间的力学行为是影响渠坡方案设计的关键因素。利用自研的大型温控直剪试验装置, 开展了正负温条件下不同初始含水率土工袋-渠坡膨胀土试样的界面剪切试验, 研究了温度和含水率对试样界面的破坏形态、剪切应力-剪切位移曲线、强度特征和剪胀规律的影响。试验结果表明: 冻结试样的破坏特征均为典型的强应变软化型, 常温试样则呈现弱应变软化和弱应变硬化两种破坏特征; 冻结状态下, 随着土体初始含水率增加, 试样的峰值强度、界面黏聚力逐渐增大, 而残余强度与界面摩擦角几乎不受影响; 常温状态下, 试样的峰值强度、残余强度、界面黏聚力与摩擦角均随土体含水率的增加而减小; 此外, 冻结试样的法向位移随剪切位移的增加呈现三段式增长趋势, 其在整个剪切过程中始终表现为剪胀; 常温试样的法向位移-剪切位移曲线较为平滑, 整体表现为低法向应力下剪胀、高法向应力下剪缩, 但在相同的法向应力下, 处于最优含水率试样的最终剪胀量最小。

关键词: 渠坡膨胀土; 土工袋; 直剪试验; 破坏形态; 强度特征; 剪胀规律

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)09-1946-10

作者简介: 田金博(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事寒区水工岩土方面的研究工作。E-mail: jinbo.tian@hhu.edu.cn。

Comparative analysis of shear characteristics of interface between soilbag and canal expansive soil under positive and negative temperature conditions

TIAN Jinbo¹, ZHANG Yonggan^{1, 2, 3}, LU Yang^{1, 3}, LIU Sihong^{1, 3, 4}, LIU Jin^{2, 4}, WU Meng²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. International Joint Laboratory of Long-term Behavior & Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies on Dams, Hohai University, Nanjing 210024, China; 4. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Soilbags have been used to prevent frost damage to canal expansive soils in cold regions. The mechanical characteristics of the interface between soil bags and canal expansive soil is a key factor for the design of the canal slope. The direct shear tests of soilbag-expansive soil interface with various water contents under positive and negative temperatures are conducted by a self-developed direct shear test device. Effects of temperature and water content on shear characteristics of the interface are studied. Test results show that: frozen samples exhibit typical strain softening failure, while the samples under positive temperatures show two failure patterns of weak strain softening and hardening. Under negative temperatures, as water content rises, peak shear strength and interfacial cohesion increase gradually, while the residual shear strength is almost unaffected. Under positive temperatures, peak and residual shear strength, interfacial cohesion and friction angle decrease with increasing water contents. Normal displacement of the frozen sample demonstrates a three-stage growth trend and exhibits shear dilatancy behavior. At positive temperatures, the sample shows shear dilatancy under low stress and shear contraction under high stress. Under identical normal stress, samples with optimal moisture content demonstrate the least final dilatancy

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109123, 52479099); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(B220203029) This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.52109123, 52479099), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. B220203029).

收稿日期(Received): 2024-05-07 修回日期(Revised): 2024-12-10 接受日期(Accepted): 2024-12-16 网络出版日期(Online): 2024-12-17

*通信作者 (E-mail: luy@hhu.edu.cn)

displacement.

Key words: canal expansive soil; soilbag; direct shear test; failure morphology; strength behavior; dilatancy characteristic

0 引言

中国膨胀土分布广泛, 遍及多个省份和地区, 其特殊的工程特性给膨胀土发育区的工程建设带来了严峻挑战^[1]。同时, 中国作为世界第三冻土大国, 众多建设在寒区与膨胀土分布重叠地区的构筑物面临着来自膨胀土与冻土的双重威胁, 其中, 寒区膨胀土地段的渠道工程由于其特殊的运行环境, 灾害问题尤为突出。譬如北疆输水干渠膨胀土渠坡运行期发生多处的冻胀隆起、滑坡失稳破坏^[2]; 东北地区北引工程乌北段渠道发生大面积膨胀土边坡滑坡^[3]。上述灾害严重影响渠道工程正常运行, 且造成了巨额经济损失。

如何保障寒区膨胀土地段输水渠道的长效运行已然成为一项亟需攻克的难题, 为此, 开挖换填^[4]、化学改良^[5]、物理加固^[2, 5]等工程措施相继提出并应用于工程实际。其中, 土工袋加固方式凭借其造价低廉、施工简易、可就地取材等优势^[6], 在众多渠道工程的设计与施工过程中得到了广泛推广应用。邓铭江等^[4]建议采用土工袋压坡措施, 提升北疆渠道膨胀土渠坡换填工程的稳定性。Liu 等^[7]对南水北调中线工程土工袋加固的膨胀土渠坡开展了现场试验, 发现土工袋可通过阻碍水分迁移来减轻下卧膨胀土的膨胀潜势。此外, 张勇敢等^[8]、李卓等^[9]通过室内试验揭示了土工袋的冻胀防治机理, 推动了土工袋在寒区渠道工程冻害防治领域中的应用。对于土工袋加固渠坡, 土工袋与渠坡土的接触面相对薄弱, 是制约加固渠坡安全稳定的重要界面, 因此, 其界面特性备受业内学者关注。陈爽等^[10]、樊科伟等^[11]、White 等^[12]相继对不同袋内材料、运行环境和堆叠方式下的土工袋开展了直剪、循环剪切试验, 得出了不同试验条件下土工袋界面剪切特性的演化规律。然而, 以往研究主要聚焦于土工袋与土工袋接触界面力学行为的探讨, 少有涉及土工袋与下卧土体界面力学特性的研究, 而进一步考虑低温冻结等环境因素影响的研究更是未见报道。

鉴于此, 本文以土工袋加固寒区膨胀土渠坡为研究背景, 聚焦于对渠道性能影响最为显著的温度和含水率两个因素, 利用自研的大型温控直剪试验装置, 开展了正负温条件下不同初始含水率土工袋-渠坡膨胀土界面直剪试验, 探究温度和含水率对土工袋-渠坡膨胀土界面破坏形态、剪切应力-剪切位移关系、强度特征和剪胀特性的影响, 以望为寒区膨胀土地段渠道工程的安全稳定设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试验装置与材料

试验采用图 1 所示的大型温控水平剪切试验装置, 主要包括加载系统、量测采集系统、制冷温控系统和剪切系统。其中, 竖向加载系统采用气压对试样施加法向应力, 可实现 0~1 MPa 范围内法向应力的快速施加, 而卧式伺服电机可在 0.01~20 mm/min 范围内精确控制剪切速率, 最大剪切荷载 100 kN。制冷温控系统主体为一台以酒精作为制冷介质的低温循环冷浴, 最低制冷温度-40℃, 控温精度±0.1℃, 其通过酒精循环管道与保温箱中的剪切盒装置内部流道相互连接, 以满足试验控温要求。剪切系统由下剪切盒(内部空腔尺寸长×宽×高为 15 cm×15 cm×10 cm)、上剪切盒(内部空腔尺寸长×宽×高为 15 cm×15 cm×13 cm)以及压力盖板等组件共同构成, 形成一套完整的剪切装置。

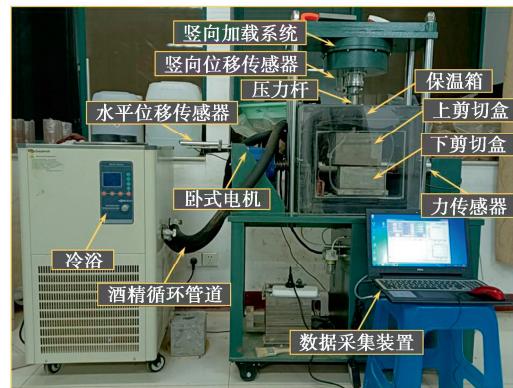


图 1 试验装置图

Fig. 1 Test apparatus

试验用土工袋为黑色聚丙烯编织袋, 单位面积质量为 100 g/m², 其经向、纬向承受的极限拉伸强度分别为 22.7, 17.2 kN/m。编织袋内装填膨胀土取自南水北调中线叶县段工程现场, 依据《土工试验方法标准: GB/T50123—2019》^[13]对其基本物理性质进行试验, 属于弱膨胀土, 具体参数见表 1。

表 1 试验用膨胀土的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of expansive soil for test

粒径组成/%			塑限	液限	塑性指数
2~ 0.5 mm	0.25~ 0.5 mm	0.1~ 0.25 mm	0.074 ~0.1 mm	<0.074 mm %	$w_p /$ $w_L /$ %
7.19	4.27	5.82	5.54	77.18	26.3
				70.8	44.5

1.2 试验方案与步骤

为探究正负温度条件下土工袋-渠坡膨胀土界面剪切特性的差异, 以此来模拟渠道工程在冬季与夏季可能经历的温度变化, 故将试验温度选取为-10℃与

20℃, 而试验用土的初始含水率分别选取为 17.7%, 21.7% (最优含水率) 和 25.7%。考虑到现场膨胀土边坡的压实度以及室内试验压实过程的难易程度, 试验选取压实度为 0.95, 对应干密度为 1.52 g/cm³。此外, 土工袋用于膨胀土渠坡处置一般采用浅层处理^[4,7], 为准确涵盖土工袋上覆压重范围, 且考虑渠坡冻胀力等因素的影响, 试验法向应力分别设置为 25, 50, 100, 200 kPa。

试验时, 首先将现场取回的渠坡膨胀土料晾晒、风干、粉碎并过 2 mm 筛后装袋封存, 随后测定其风干含水率。试样制备前, 均匀喷洒预定质量的蒸馏水至一定质量的风干土中, 使其达到试验目标含水率后装入保鲜袋中静置。接着采用图 2 所示试验步骤进行试样制备: ①称取试验土料分别装入下剪切盒和土工编织袋中, 并将土工袋堆叠在膨胀土上方, 采用击实法将土工袋-膨胀土试样整体击实至目标干密度 (1.52 g/cm³); ②将剪切盒放入直剪试验装置的保温箱中, 随后采用循环冷浴对试样进行低温冻结, 通过试样中心位置布置的温度传感器实时监测温度变化, 使试样在-10℃环境中冻结 24 h 以确保冻结稳定 (20℃工况下无此步骤); ③试样冻结稳定后首先施加法向应力对试样进行固结, 待固结稳定后, 开启水平向电机并以 1 mm/min 的剪切速率开始剪切, 直至剪切位移达 15 mm (10%应变) 后结束试验^[13]。

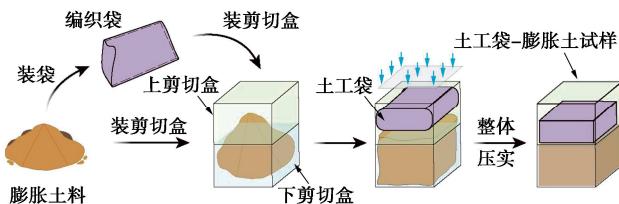


图 2 试验流程图

Fig. 2 Test procedure

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态

(1) -10℃工况

图 3 给出了-10℃工况下土工袋-膨胀土试样破坏前后的典型界面形态, 发现其形态大致相同。可以看出, 试样剪切前, 土工袋与膨胀土接触面呈现为圆弧型, 且上部剪切盒中土工袋周围嵌固有膨胀土, 这是因为在压实作用下, 袋内土体单元沿大主应力方向发生压缩变形, 沿小主应力方向发生伸长变形 (即侧向膨胀), 受限于袋体张力作用, 土工袋袋体的横向伸长变形受到限制, 进而形成圆弧型接触面^[6], 这种接触面型式也更加符合工程实际^[7]。此外, 试样剪切后, 圆弧型接触面未受到明显破坏, 但嵌固在土工袋周围

的膨胀土沿上下剪切盒接触面被剪断。再者, 下剪切盒内的膨胀土表面会因压实作用而形成与土工袋经、纬丝相对应的横、纵向压痕, 其剪切过程中与土工袋袋体间发生相互错动, 进而导致剪切破坏后土工袋袋体表面形成褶皱、袋体表面的经纬丝交叉点赋存咬合土颗粒, 这正是土工袋与膨胀土界面间咬合摩擦强度的主要来源。上述试验现象在 Chao 等^[14]、Khan 等^[15]的研究中也有所发现, 并将其称之为“耕犁机制”。

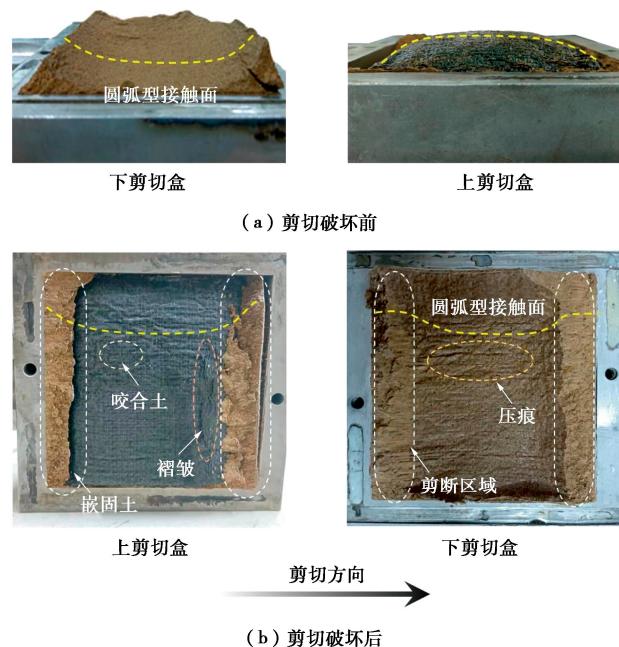


图 3 -10℃下试样典型破坏形态

Fig. 3 Typical failure mode of sample at -10°C

(2) 20℃工况

图 4 给出了常温工况下土工袋-膨胀土试样的典型破坏形态, 可以看出, 含水率和法向应力对常温试样的破坏形态影响显著。具体来说, 在 25 kPa 工况下, 界面间的圆弧型接触面在剪切过程中演变为“S”型, 而在 200 kPa 工况下, 圆弧型接触面逐渐趋于平坦化, 这是由于常温膨胀土的抵抗变形能力相对较弱, 剪切过程中剪切带内的土颗粒容易发生位置调整^[16-17], 但可调整的幅度受法向应力的大小直接影响, 进而呈现出“隆起”和“碾平”两种不同的接触面形态。此外, 含水率 17.7% 试样的界面略显暗淡, 而含水率 25.7% 试样界面则呈现出明显的光泽, 这是因为高含水率试样在土-土工袋界面处形成了一层水膜。

2.2 剪切应力-剪切位移曲线

因剪切过程中试样的接触面面积不断变化, 所以在进行剪切应力计算时有必要对其进行如下修正:

$$\tau = \frac{F_s}{(L-x)W} \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力 (kPa); F_s 为力传感器记录的水平剪切力 (kN); x 为通过水平位移传感器记录的剪切

位移 (mm); L 和 W 分别为剪切盒的长度和宽度, 均为 15 cm。

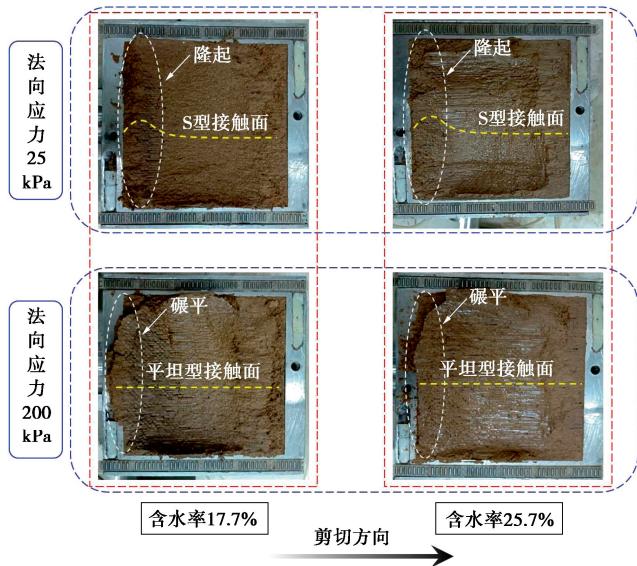


图 4 20°C 下试样典型破坏形态

Fig. 4 Typical failure mode of sample at 20°C

(1) -10°C 工况

图 5 为-10°C 工况下试样的剪切应力-剪切位移曲线。可直观看出, -10°C 下试样的剪切应力-剪切位移曲线均呈现典型的应变软化破坏特征, 但在相同法向应力下, 随着土体初始含水率的增加, 试样的曲线形态逐渐由弱软化型过渡到强软化型, 也即试样的脆性破坏特征逐渐显著。这是因为在相同的试验温度下, 土体的初始含水率越高, 土工袋-膨胀土界面冰晶含量越高, 由其提供的冰胶结强度越强, 导致试样发生剪切破坏后强度的损失越明显^[1]。此外, 在相同初始含水率下, 随着法向应力的增加, 试样的脆性破坏特征逐渐弱化, 这是由于在较高法向应力下, 界面间的摩擦强度在抵抗剪切变形中占比增加, 从而削弱了试样的脆性破坏特征^[16]。再者, 相同法向应力下, 试样应力-位移曲线的初始阶段基本重合, 这意味着不同初始含水率试样的初始剪切刚度差异较小, 但高含水率试样在剪切过程中明显具有更大的剪切应力, 这与试样界面处的冰晶含量密切相关。

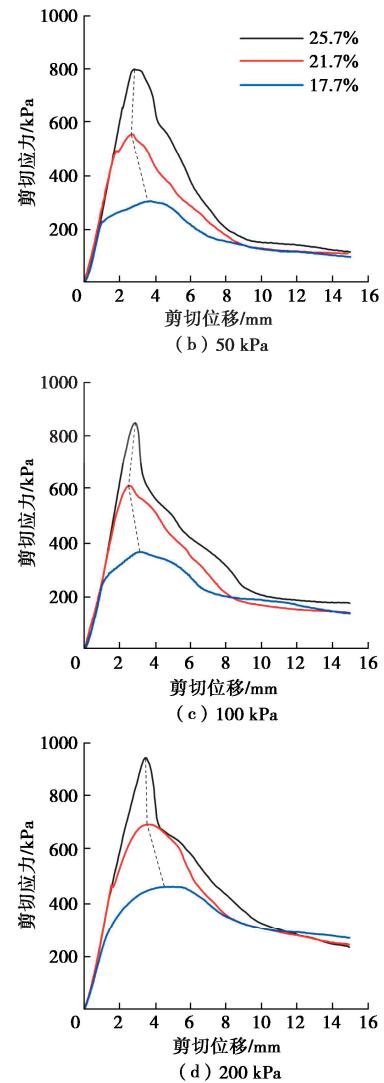


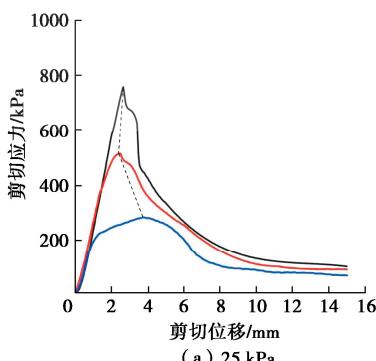
图 5 -10°C 下试样的剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 5 Shear stress-shear displacement curves at -10°C

将峰值强度点对应的剪切位移定义为试样的破坏位移, 从图 5 还可以看出, 在相同的法向应力下, 试样的剪切破坏位移随含水率增大而先减小后增加, 产生上述现象的原因可解释如下: 如图 6 所示, 随着土体初始含水率的增加, 冻结试样界面处冰晶含量根据其赋存状态可划分为少冰型、多冰型和富冰型, 其中对于少冰型试样 ($w=17.7\%$), 剪切过程中以颗粒间摩擦作用为主导, 达到峰值强度需要的剪切位移相对较大; 对于多冰与富冰型试样 ($w=21.7\%, 25.7\%$), 界面处以冰胶结作用为主导, 试样脆性破坏特征增强, 破坏位移显著降低^[17-18], 但由于含水率 25.7% 试样界面处冰晶的富集 ($S_f=0.9$), 剪切过程中呈现出流变特性^[19], 导致破坏位移出现轻微增长。

(2) 20°C 工况

图 7 为 20°C 下试样的剪切应力-剪切位移曲线。与负温工况显著不同的是, 常温试样的剪切应力-剪切位移曲线在较低法向应力工况下呈现为弱软化型, 而在 200 kPa 高法向应力下则趋向于弱硬化型, 这是因



为常温试样主要通过颗粒间的咬合摩擦、黏聚力和筋土间“耕犁”作用抵抗剪切变形,其发生剪切破坏后,试样抵抗剪切变形的来源并没有明显的改变,因此峰值强度后的剪切应力衰减并不显著,且较高的法向应力致使颗粒紧密接触,抑制试样的剪切软化趋势^[20]。此外,在相同法向应力下,与含水率 21.7% 和 25.7% 的试样相比,含水率 17.7% 试样的峰值、残余剪切应力及曲线的硬化特征更为显著,这是因为含水率 17.7% 试样界面处的水分以结合水为主,其具有强黏滞性、弹性等特征,同时土体基质吸力也相对较强,对于提高试样强度、抑制试样破坏具有促进作用^[21-22]。

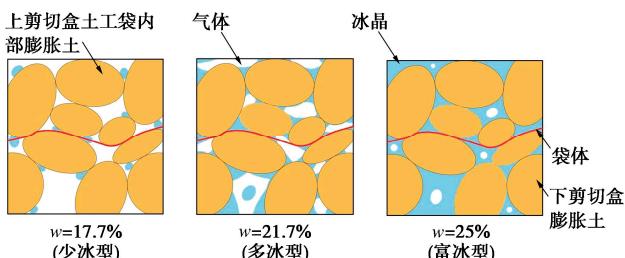


图 6 -10°C 工况不同含水率试样的界面示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of sample interface with different moisture contents at -10°C

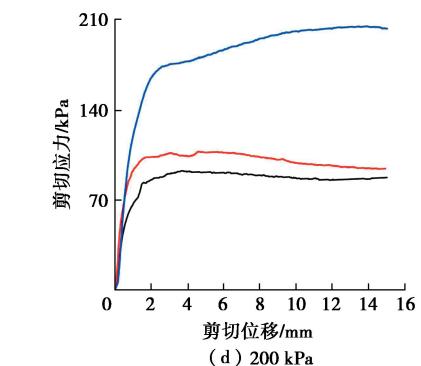
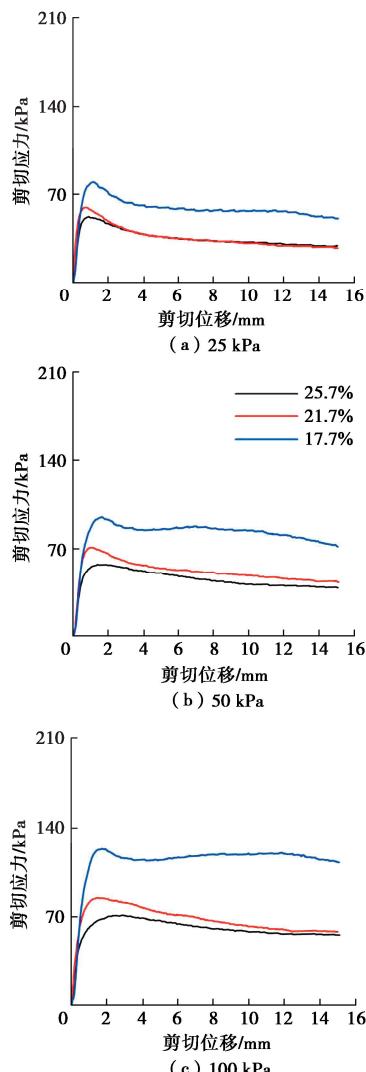


图 7 20°C 下试样的剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 7 Shear stress-shear displacement curves at 20°C

2.3 强度特征

对于呈现软化型破坏特征的试样,选取其峰值剪切应力作为峰值强度;而对于呈现硬化型破坏特征的试样,选取 10 mm 剪切位移对应的剪切应力作为试样的峰值强度^[13];对于试样的残余强度,统一定义为剪切位移达到 15 mm 处所对应的剪切应力。

(1) 峰值强度

图 8 给出了试样峰值强度与含水率之间的变化关系。可直观看出,随着土体初始含水率的增加,冻结试样的峰值强度近似线性增大,而常温试样的峰值强度不断衰减,产生上述现象的原因可解释如下:对于冻结试样,随着土体初始含水率的增加,试样界面处含冰量增大,直接导致土工袋-膨胀土界面的冰胶结强度和土体本身强度增大,宏观上表现为峰值强度的不断增大;对于常温试样而言,随着土体含水率增加,试样内水分的赋存形式将从结合水过度到自由水,水膜的润滑作用增强,且土体基质吸力不断降低,最终导致试样的峰值强度不断衰减^[17, 21]。试样峰值强度随含水率的变化规律,可为通过测量土体含水率,进而预估土工袋与渠坡土体间的强度提供便捷。此外,不同法向应力下冻结试样峰值强度随含水率增大而增加的趋势具有较大的相似性,这是因为冻结试样峰值强度主要由冰胶结强度贡献,其受法向应力的影响相对较小。常温工况下,含水率增加对强度的弱化作用随着法向应力的增大而增强,因为较高法向应力下试样对界面粗糙程度的变化更加敏感,由水膜诱发的润滑作用会被放大,增大了试样发生剪切破坏的可能性,从而加速了强度的衰减,类似的试验规律在刘飞禹等^[20]、刘龙旗等^[21]的研究中也有发现。

结合试样的破坏形态(图 3)分析,由于土工袋周围嵌固的土体作为土工袋-膨胀土界面组成中重要的组成部分,因此,通过直剪试验测得的土工袋-膨胀土界面强度,实质上是由土工袋-膨胀土接触面强度与嵌固土强度两部分构成,这也是土工袋在土体加固过程中嵌固效果的直接体现。此外,本文试验结果充分

考虑了土工袋周围嵌固土的影响, 这将为工程设计与施工提供更为经济、科学的设计裕度指导。

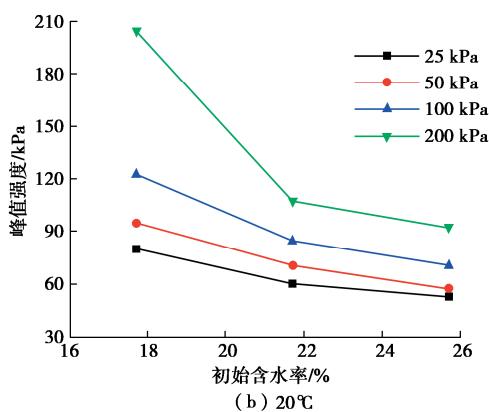
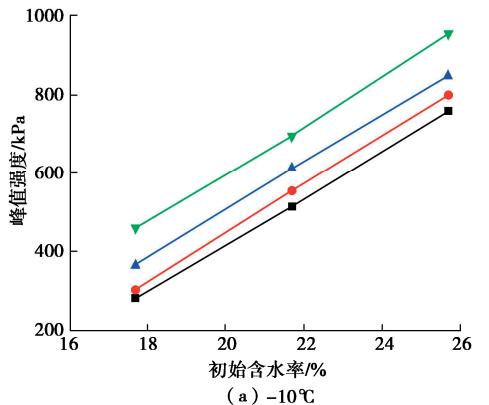


图 8 峰值强度与含水率的关系

Fig. 8 Relationship between peak shear strength and water content

图 9 为试样峰值强度与法向应力之间的变化关系。可以看出, 无论试样是否冻结, 试样峰值强度均随法向应力的增加而线性增大, 这是由于在较高的法向应力下, 颗粒间咬合程度以及界面处“耕犁”作用增强, 从而提高试样的峰值强度^[20]。值得注意的是, 随着法向应力的增加, 峰值强度增速在各含水率冻结试样间差异较小, 但其在不同含水率常温试样下差异显著, 表现为含水率越低, 峰值强度增速越快, 这是由于低含水率常温试样界面处的水膜润滑作用较弱, 而土体基质吸力较强导致^[22]。

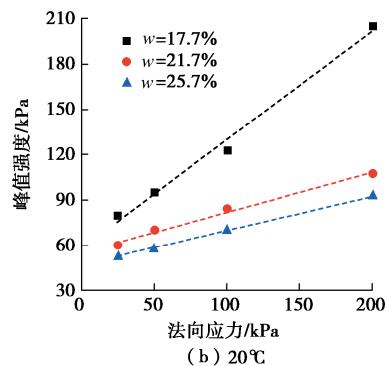
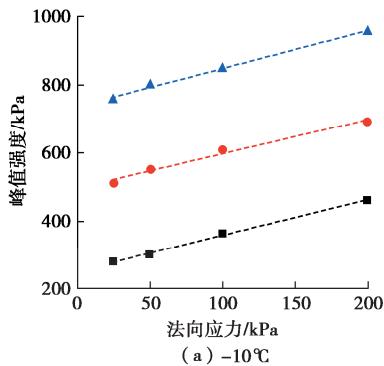


图 9 峰值强度与法向应力的关系
Fig. 9 Relationship between peak shear strength and normal stress

(2) 残余强度

图 10 给出了试样残余强度随含水率和法向应力的变化规律。可以看出, 在相同试验工况下, 冻结试样的残余强度整体展现出更大的数值, 这是因为在残余剪切阶段, 相比与常温试样, 冻结试样剪切过程中受水膜润滑的影响较弱, 且由再生冰晶提供的冰胶结强度作为残余强度的又一来源^[23], 导致其残余强度高于常温试样。此外, 冻结试样的残余强度随法向应力的增大而增强, 但随含水率的变化出现小幅波动现象, 这是因为冻结试样在残余剪切阶段, 原生冰晶遭受剪切破坏, 冰胶结强度损失严重, 此时界面处摩擦强度在残余强度中贡献较大, 而摩擦强度更依赖于法向应力的变化, 受含水率的影响较小, 且受再生冰晶数量的不确定性等多种因素影响, 造成不同含水率下试样残余强度略有波动。对于常温试样, 其残余强度随土体含水率的降低和法向应力的增加而提高, 这是因为含水率的降低会提高土体基质吸力, 而法向应力的增加则会增大界面间的摩擦强度, 两者共同促进常温试样残余强度的提升^[20, 22]。

2.4 强度参数

图 9 可以看出, 试样峰值强度与法向应力之间呈线性关系, 借鉴相关界面剪切试验中采用的理论方法^[17, 23], 可借助莫尔-库仑强度准则对其进行分析:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2)$$

式(2)给出了界面黏聚力 c 与界面摩擦角 φ 两个强度参数, 其与土体初始含水率之间的关系如图 11 所示。可见, 随着土体初始含水率的增加, 冻结试样的界面黏聚力呈线性增大趋势, 而界面摩擦角却受含水率的影响相对较小, 其仅在 $45^\circ \sim 47^\circ$ 小范围内波动, 这是因为伴随含水率的增大, 冻结试样界面处胶结作用增强, 宏观上表现为界面黏聚力的增大, 而胶结冰含量的增加并不会显著改变界面处咬合摩擦特性, 但受界面的不平整性、筋土间咬合嵌固和冰晶润滑等因素影响, 界面摩擦角会出现小范围波动现象^[17, 23]。对于常温试样, 其界面摩擦角与黏聚力均随含水率的增大而

降低,这是因为随着含水率增加,土体基质吸力降低^[22],又受水膜润滑作用的影响,界面处咬合与滑动摩擦作用遭受弱化,最终导致内摩擦角减小。

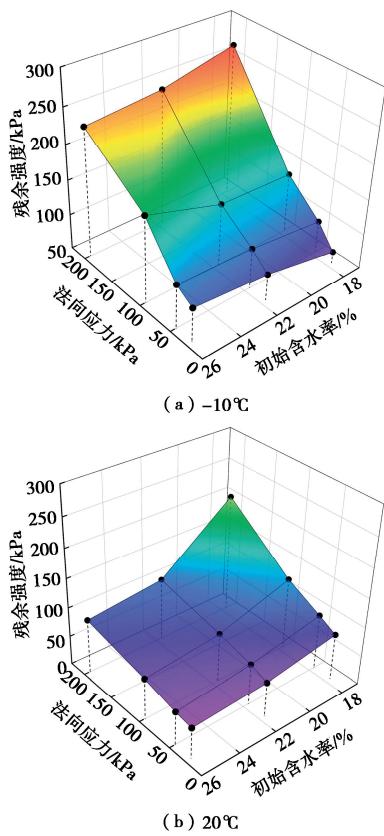


图 10 试样残余强度的变化规律

Fig. 10 Variation law of residual shear strength

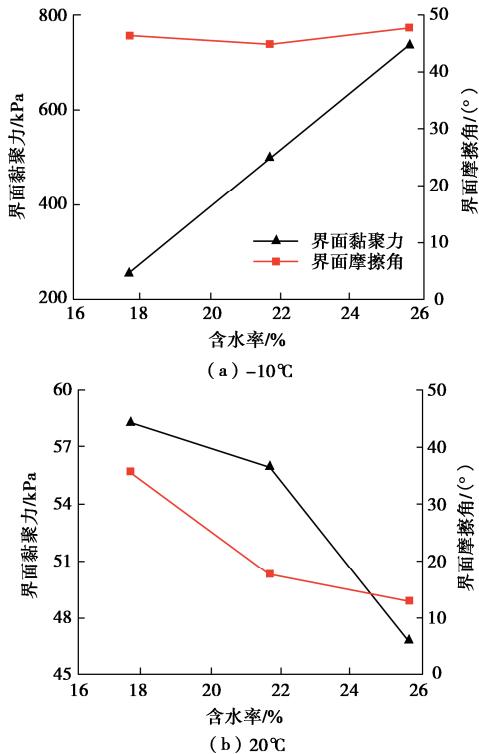


图 11 强度参数与含水率的关系

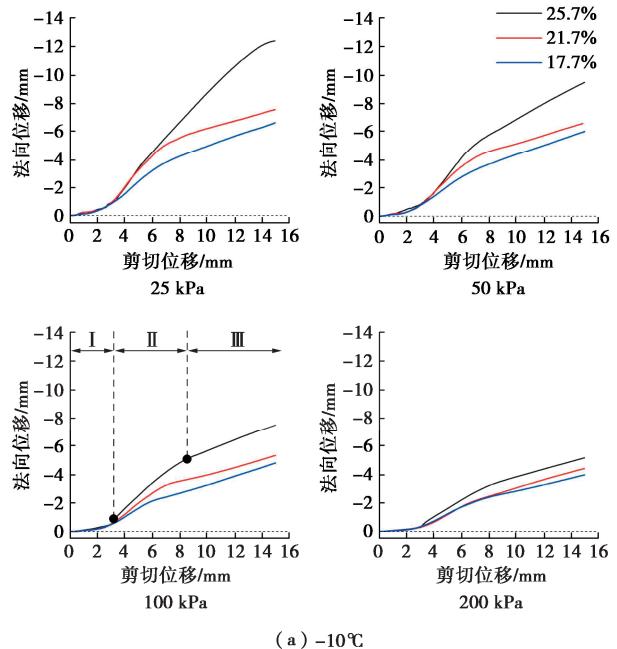
Fig. 11 Relationship between strength parameters and water content

2.5 剪胀特性

(1) 法向位移-剪切位移曲线

本文记正值法向位移代表剪缩,负值代表剪胀。

图 12 (a), (b) 分别给出-10°C 与 20°C 下试样的法向位移-剪切位移曲线。通过对比可发现,不同温度下试样法向位移-剪切位移曲线形态特征具有显著差异。具体来说,冻结试样的法向位移均为负值,意味着其在剪切过程中呈现剪胀现象,这是因为冻结状态下,土体孔隙多数被冰晶填充,颗粒向孔隙间运动受阻,从而降低了试样发生剪缩的可能性^[16]。此外,冻结试样的剪胀曲线形态呈现出缓慢—快速—缓慢的三段式增长趋势(如图 12 (a) 中含水率 25.7%, 100 kPa 的试样所示),产生上述现象的原因可借助冻结试样剪切过程示意图(图 13)进行解释:在剪切初始阶段,界面处冰胶结强度未遭受破坏,颗粒相互黏连,限制了颗粒发生位置重调整,宏观上表现为试样的法向位移缓慢变化,剪胀现象相较小;伴随剪切位移的增加,界面处冰胶结作用逐渐破坏,界面附近颗粒发生翻滚、滑动,从而导致试样的法向位移迅速增大;在较大的剪切位移下,界面处冰胶结作用完全破坏,但试样界面始终保持圆弧型形态(图 3),此时土工袋体将沿接触面“爬升”,试样的法向位移持续缓慢增加,即试样进入缓慢剪胀阶段。对于常温试样,其剪胀曲线形态相较小,且试样在较低法向应力下呈现为剪胀,高法向应力工况下(200 kPa)则过渡到剪缩,这是由于水分的存在弱化了颗粒连接,促使颗粒在剪切过程中更加容易地发生连续性位置重调整,宏观上反映为试样剪胀曲线的平滑特征,且高法向应力对剪胀存在抑制作用,进一步促进了剪缩现象的出现^[20, 22]。



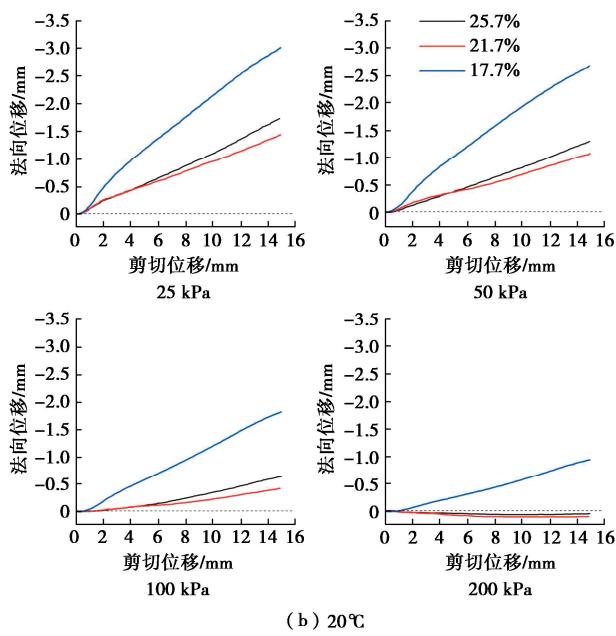


图 12 试样的法向位移-剪切位移曲线

Fig. 12 Normal displacement-shear displacement curves of samples

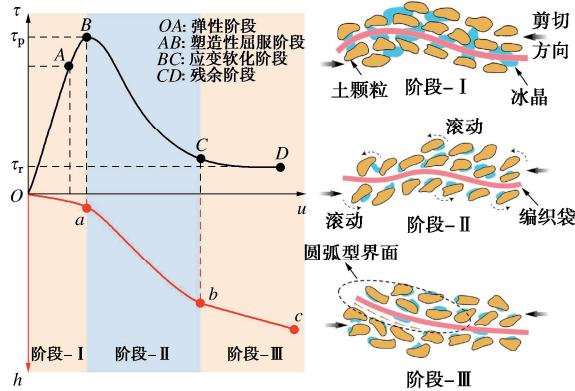


图 13 冻结试样剪切过程示意图

Fig. 13 Schematic diagram of shearing process of frozen sample

(2) 剪胀位移

为进一步量化试样的剪胀特征, 选用试验结束时试样的法向位移作为最终剪胀位移对其进行量化分析, 图 14 给出-10℃、20℃下试样最终剪胀位移的变化规律。从图 14 (a) 可以看出, 对于冻结试样, 初始含水率越高且法向应力越低的工况, 试样的最终剪胀量越大, 这是因为随着土体初始含水率增加, 试样界面处胶结作用增强, 剪切过程中颗粒间相互作用力增大, 且颗粒间作用力的影响范围变广, 进而形成颗粒聚集体和宽厚的剪切带^[16, 24], 而较低的法向应力会削弱对剪胀的抑制作用, 导致试样的最终剪胀量增大。

从图 14 (b) 可以看出, 对于常温试样, 相较于含水率 17.7% 试样, 含水率 21.7% 与 25.7% 试样的最终剪胀量相对较小, 这是因为随着含水率增加, 试样界

面处的水膜降低了颗粒间相互错动过程中的摩擦阻力, 致使界面附近的土体更加容易发生剪切、压缩变形^[21], 且颗粒间相互作用力降低, 进而无法形成宽厚的剪切带, 导致较高含水率试样的最终剪胀量相对较小。值得注意的是, 各法向应力工况下, 剪胀最弱或剪缩最明显的均是最优含水率 21.7% 试样, 这可能是对于超过最优含水率的试样, 土体孔隙多数被水分填充, 致使含水率 25.7% 的试样难以被进一步压实, 而处于最优含水率的试样有朝着土样最大干密度被进一步压实的趋向, 故含水率 21.7% 试样的剪胀量最小或剪缩量最大, 这在 Ferreira 等^[22]的试验中也有所发现。

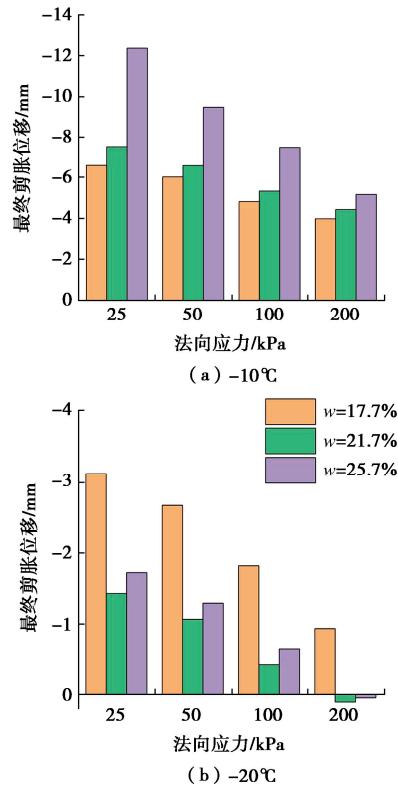


图 14 试样最终剪胀位移的变化规律

Fig. 14 Variation law of final shear dilatancy displacement

3 结 论

利用自研的大型温控直剪试验装置, 开展了不同初始含水率下土工袋-渠坡膨胀土界面在正负温度下的直剪试验, 探究了温度和初始含水率对土工袋-膨胀土界面剪切力学规律和作用机制的影响, 主要得到以下 5 点结论。

(1) 制备完成的土工袋-膨胀土试样界面呈现为圆弧型, 但不同温度下试样的破坏形态差异显著: 冻结试样破坏后保留了完好的圆弧型界面形态, 而常温试样破坏后其接触面形态演变成“S”型或平坦型, 且高含水率试样界面处附着有一层光亮水膜。

(2) 冻结试样的剪切应力-剪切位移曲线均为强

软化型, 且随着土体初始含水率的增加, 试样的软化型破坏特征愈发显著, 但试样的破坏位移呈现先减小后增大的变化规律; 常温试样则展现出弱软化型或弱硬化型两种破坏特征, 而随着法向应力增高, 试样的硬化特征增强。

(3) 冻结试样的峰值强度随土体初始含水率和法向应力的增加而增强, 但其残余强度可认为仅受控于法向应力的影响; 随着法向应力的增加与土体含水率的降低, 常温试样的峰值强度与残余强度均逐步增强。

(4) 冻结试样的界面黏聚力随着含水率的增大近似线性增加, 而内摩擦角受含水率变化的影响相对较小, 其仅在 $45^\circ \sim 47^\circ$ 小范围内波动; 常温试样的界面黏聚力与内摩擦角均随含水率的增大而降低。

(5) 冻结试样在剪切过程中均为剪胀, 其剪胀曲线形态呈现出缓慢—快速—缓慢的三段式增长趋势, 且最终剪胀量随着法向应力的减小和含水率的增加而增大; 对于常温试样, 随着法向应力和初始含水率的增加, 最终剪胀量逐渐减小, 但各法向应力下均是最优含水率试样的剪胀量最小或剪缩量最大。

本文基于土工袋实际运行状况, 将袋体周围嵌固土的影响纳入了考量范畴, 试验测得的土工袋-膨胀土界面强度包含嵌固土强度与土工袋-膨胀土接触面强度两部分, 该设计不仅是本文的特色之处, 所得研究成果也有望更为准确地服务工程实际。事实上, 明晰嵌固土与接触面各自强度在土工袋-膨胀土界面总强度中的分担和贡献这一科学问题, 可进一步揭示界面强度的发挥机制, 后续将对此进行深入研究。

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: 田金博、张勇敢和鲁洋共同设计试验方案, 刘斯宏和刘瑾提供研究指导; 张勇敢、鲁洋和刘斯宏共同研发大型温控水平剪切试验装置; 田金博、张勇敢和鲁洋完成试验操作与试验数据分析; 田金博、张勇敢、鲁洋和武猛共同完成论文写作与修改; 所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by TIAN Jinbo, ZHANG Yonggan and LU Yang and supervised by LIU Sihong and LIU Jin. The large-scale temperature-controlled shear test apparatus was designed by ZHANG Yonggan, LU Yang and LIU Sihong. Shear test operation and test results analysis were completed by TIAN Jinbo, ZHANG Yonggan and LU Yang. The manuscript was drafted and revised by TIAN Jinbo, ZHANG Yonggan, LU Yang and WU Meng. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

[1] 张勇敢, 鲁 洋, 刘斯宏, 等. 基于巴西劈裂试验的冻结膨

胀土拉伸特性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 2046-2054. (ZHANG Yonggan, LU Yang, LIU Sihong, et al. Experimental study on tensile strength of frozen expansive soils based on Brazilian splitting tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(11): 2046-2054. (in Chinese))

- [2] 蔡正银, 张 晨, 朱 涣, 等. 高寒区长距离供水工程能力提升与安全保障技术[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1239-1254. (CAI Zhengyin, ZHANG Chen, ZHU Xun, et al. Improvement of capacity and safety protection technology for long-distance water delivery projects in cold regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1239-1254. (in Chinese))
- [3] 张思钰, 张勇敢, 鲁 洋, 等. 考虑循环冻融历史与初始各向异性的非饱和膨胀土冻结变形特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(5): 1004-1013. (ZHANG Siyu, ZHANG Yonggan, LU Yang, et al. Experimental study on freezing deformation characteristics of unsaturated expansive soil considering cyclic freeze-thaw and initial anisotropy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(5): 1004-1013. (in Chinese))
- [4] 邓铭江, 蔡正银, 朱 涣, 等. 北疆渠道膨胀土边坡破坏机制及加固措施[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 2): 50-55. (DENG Mingjiang, CAI Zhengyin, ZHU Xun, et al. Failure mechanism and reinforcement measures of shallow slopes of expansive soils in Northern Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 50-55. (in Chinese))
- [5] 张勇敢, 刘斯宏, 鲁 洋, 等. 袋装膨胀土强度变形特性及其碾压质量控制与检测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 118-123. (ZHANG Yonggan, LIU Sihong, LU Yang, et al. Strength and deformation characteristics, compaction quality control and inspection of soilbags filled with expansive soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 118-123. (in Chinese))
- [6] MATSUOKA H, LIU S H. A New Earth Reinforcement Method Using Soilbags[M]. London: CRC Press, 2005.
- [7] LIU S H, LU Y, WENG L P, et al. Field study of treatment for expansive soil/rock channel slope with soilbags[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(4): 283-292.
- [8] 张勇敢, 鲁 洋, 刘斯宏, 等. 土工袋抑制膨胀土冻胀性能试验及机制探讨[J]. 岩土力学, 2024, 45(3): 759-768, 796. (ZHANG Yonggan, LU Yang, LIU Sihong, et al. Experimental study and mechanism exploration of soilbags for inhibiting frost heaving performance of expansive soil[J]. Rock and Soil

Mechanics, 2024, **45**(3): 759-768, 796. (in Chinese))

[9] 李卓, 盛金保, 刘斯宏, 等. 土工袋防渠道冻胀模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(8): 1455-1463. (LI Zhuo, SHENG Jinbao, LIU Sihong, et al. Model tests on frost heave-prevented channels using soilbags[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(8): 1455-1463. (in Chinese))

[10] 陈爽, 贾凡, 刘斯宏, 等. 错缝堆叠土工袋层间界面的循环剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(增刊 1): 2945-2953. (CHEN Shuang, JIA Fan, LIU Sihong, et al. Experiments on the cyclic shear behavior of the interface between staggered stacking soilbags[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(S1): 2945-2953. (in Chinese))

[11] 樊科伟, 刘斯宏, 廖洁, 等. 袋装石土工袋剪切力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(2): 477-484. (FAN Kewei, LIU Sihong, LIAO Jie, et al. Experimental study on shearing characteristics of pebbles-filled soilbags[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(2): 477-484. (in Chinese))

[12] WHITE K, SHE Y T, ZHANG W M. A comparison of shear stress estimation methods for a single geobag on a rough bed[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2022, **50**(6): 1230-1243.

[13] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))

[14] 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.

[15] KHAN R, LATHA G M. Multi-scale understanding of sand-geosynthetic interface shear response through Micro-CT and shear band analysis[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2023, **51**(3): 437-453.

[16] CHANG D, YAN Y H, LIU J K, et al. Micro-macroscopic mechanical behavior of frozen sand based on a large-scale direct shear test[J]. Computers and Geotechnics, 2023, **159**: 105484.

[17] 温智, 俞祁浩, 马巍, 等. 青藏粉土-玻璃钢接触面力学特性直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(增刊 2): 45-50. (WEN Zhi, YU Qihao, MA Wei, et al. Direct shear tests for mechanical characteristics of interface between Qinghai-Tibetan silt and fiberglass reinforced plastics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(S2): 45-50. (in Chinese))

[18] 吕鹏, 刘建坤. 冻土与混凝土接触面直剪试验研究[J]. 铁道学报, 2015, **37**(2): 106-110. (LÜ Peng, LIU Jiankun. An experimental study on direct shear tests of frozen soil-concrete interface[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, **37**(2): 106-110. (in Chinese))

[19] 何菲, 王旭, 蒋代军, 等. 基于含冰量的冻结砂土-混凝土接触面蠕变特性[J]. 西南交通大学学报, 2024, **59**(2): 361-368. (HE Fei, WANG Xu, JIANG Daijun, et al. Creep characteristics of frozen sand-concrete interface based on ice content[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, **59**(2): 361-368. (in Chinese))

[20] 刘飞禹, 陈舒祺, 孙宏磊, 等. 不同含水率花岗岩残积土-格栅界面剪切特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, **51**(2): 222-228. (LIU Feiyu, CHEN Shuqi, SUN Honglei, et al. Shear characteristics of granite residual geogrid-soil interface with different water contents[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, **51**(2): 222-228. (in Chinese))

[21] 刘龙旗, 毛雪松, 肖亚军, 等. 含水率对坡积体路基填料剪切特性影响试验研究[J]. 中国公路学报, 2020, **33**(9): 126-135. (LIU Longqi, MAO Xuesong, XIAO Yajun, et al. Effect of water content on shear characteristics of landslide deposit subgrade fillers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, **33**(9): 126-135. (in Chinese))

[22] FERREIRA F B, VIEIRA C S, LOPES M L. Direct shear behaviour of residual soil - geosynthetic interfaces-influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type[J]. Geosynthetics International, 2015, **22**(3): 257-272.

[23] 何鹏飞, 马巍, 穆彦虎, 等. 冻融循环对冻土-混凝土界面冻结强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(2): 299-307. (HE Pengfei, MA Wei, MU Yanhu, et al. Experiment study on effects of freeze-thaw cycles on adfreezing strength at frozen soil-concrete interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(2): 299-307. (in Chinese))

[24] PAN R K, YANG P, YANG Z H. Experimental study on the shear behavior of frozen cemented sand-structure interface[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, **197**: 103516.