

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0057

MA Xiaohan, XUE Ke, GAO Qiang, et al. Impact of lining roughness on peak shear strength of soil-lining interface in seasonal frozen zone[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):535-544. [马小涵, 薛珂, 高樯, 等. 衬砌粗糙度对季节冻土区渠基土-衬砌接触面间峰值抗剪强度的影响[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2):535-544.]

衬砌粗糙度对季节冻土区渠基土-衬砌接触面间峰值抗剪强度的影响

马小涵^{1,2}, 薛珂¹, 高樯³, 张明礼⁴, 刘建平¹,
谢军¹, 向卿², 杨明东²

(1. 四川农业大学 水利水电学院, 四川 雅安 625000; 2. 四川农业大学 环境学院, 四川 成都 611130; 3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 4. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 710050)

摘 要: 目前来看,在构筑物与土体表面粗糙度影响土-构筑物接触面间切向冻胀力方面的研究还较少,因此,本研究从川西季节冻土区渠基土-衬砌接触面的切向冻胀力问题出发,着重考虑衬砌表面粗糙度这一因素对接触面间抗剪强度、黏聚力、内摩擦角的影响规律和影响效应,并结合环境温度、含水率及冻结时长,利用正交分析综合探究了4种因素对接触面间峰值抗剪强度影响的相关性和显著性,结果表明:接触面间抗剪强度、黏聚力、内摩擦角随衬砌表面粗糙度变化呈现相同规律,即衬砌表面越粗糙,3项指标随即增大。正交分析中揭示了影响接触面间峰值抗剪强度大小最显著的因素是衬砌粗糙度,其次是环境温度和含水率,冻结时长的影响效应不显著,同时低温、低含水率、较长冻结时长、较高衬砌粗糙程度下的峰值抗剪强度越大。此项结果可为季节冻土区渠系工程防冻胀危害提供理论支撑。

关键词: 季节冻土区; 渠基土-衬砌接触面; 衬砌粗糙度; 峰值抗剪强度

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0535-10

0 引言

冻结土体与各类工程设施接触面有关冻胀变形、剪切滑移等问题一直以来都是冻土与构筑物间力学问题中的重难点问题^[1-4]。当前此类研究地域较多集中于中国西北、东北等冻土分布较为密集的地区,对于川西高原地区研究鲜少。而川西高原地区是川藏铁路沿线的重要必经地域,其道路及周遭农业设施(如灌渠)极大地影响着当地人民的农业生产^[5-7]。经过实地调查发现,川西高原地区农业灌渠受冻胀融沉破坏影响较大,多数灌渠的衬砌板因未进行严格规范地衬砌而造成衬砌板垮塌、崩落,这些衬砌板大多仅用现浇混凝土浇筑,衬砌板表面质地较均匀单一,较多衬砌板上未经过粗糙处理,目前有研究表明构筑物表层存在一定粗糙度时可

以适当降低构筑物与土间的剪切破坏效应,但具体的影响表现和程度暂不明确^[8-9]。因此,本研究着力点为探究粗糙度这一指标对川西高原冻结土-灌渠衬砌接触面切向冻胀力的影响,该项研究可为川西高原地区渠系工程防冻胀破坏提供重要理论指导^[10-11]。

前人已针对各类影响因素——含水率、温度、构筑物表面粗糙程度等对各类土体与构筑物间的抗剪破坏效应做出相当研究,但衬砌粗糙度在灌渠中的研究鲜有报道。基于王正中等^[12]在2004年提出渠道基土-衬砌接触面间的冻结力是影响切向冻胀力的主要因素,但各类因素对于切向冻胀力的影响规律及影响效果暂不明确。刘鸿绪等^[13]在青藏高原开展了室外模型桩基础试验,观察模型桩基础

收稿日期: 2022-02-22; 修订日期: 2022-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907242;41961010)资助

作者简介: 马小涵,博士研究生,主要从事农业水土环境及气候变化方面研究. E-mail: 963073641@qq.com

通信作者: 薛珂,讲师,主要从事冻土工程方面的研究. E-mail: tumuxk@163.com

两侧表面切向冻胀力的形变特征,结果表明桩基础侧面与土的切向冻胀力和桩基础表面粗糙度有关,但并未揭示随粗糙度变化时切向冻胀力的变化规律。孙厚超等^[14]、石泉彬等^[15]利用改良后的新型冻土-构筑物接触面循环剪切仪,探究了包括粗糙度在内的几种因素对接触面间抗剪强度的影响程度,试验结果揭示了接触面粗糙度、含水率、环境温度对其力学特性影响较大,但具体的影响程度也暂不明确。陈拓等^[16]在不同环境温度、外部荷载以及初始含水率的条件下探究了青藏高原黏土与不同粗糙度钢板接触面的剪切试验,并作正交分析以探究高原冻胀黏土与不同粗糙度的钢接触面冰胶结力的主要影响因素以及相互作用,试验结果表明初始含水率是影响交互表面之间冰胶结能力的最主要原因,此试验结论可为本研究提供重要理论参考,但研究结论较为局限,并且与本次研究对象(包括其他冻胀土-构筑物接触表面)差异较大^[17-18]。何鹏飞等^[8]在冻结黄土-混凝土界面试验中发现冰胶结力受外部荷载影响较小,但受含水率和冻结温度影响较大;章赛泽等^[19]在研究灌渠下卧土-混凝土衬砌接触面时发现接触面内峰值抗剪强度会随含水率、冻结时间、外部荷载的增加,以及温度的降低而增大,但两项研究中各指标对峰值抗剪强度具体的影响程度未能揭示,也未考虑混凝土界面粗糙程度的影响。

因此本研究根据川西高原冻胀土-灌渠衬砌接

触面的相关特点,重点综合分析在不同因素变化下灌渠衬砌粗糙度对土-衬砌接触面间切向冻胀力的影响规律和影响相关性,为后续研究构筑物表面粗糙度对构筑物冻胀力学特性提供理论支撑^[20-22]。

1 试验材料及过程

1.1 试验土样制备

由于与灌渠直接接触的土属于土体表层及浅层土,并且该位置的土样大多具有较敏感的冻胀特性,因此本研究试验土选用甘孜藏族自治州翁达镇某一季节冻土区灌渠基础上的浅层土,取土地点坐标为100°43'42" E, 31°52'25" N,其卫星图如图1,灌渠浅层土样如图2。基于该地区一年四季降雨量差异较大,后续研究将开展负温条件下含水率对渠基土-衬砌接触面抗剪强度的试验,因此需要测得该地区实际的天然含水率值作为研究含水率这一重要因素的取值范围。为排除较多可能影响天然含水率的无关因素,本试验在2018—2020年的12月10日—20日,连续三年到该地点取土10天,每天1次,并用烘干称重法测得这三年来渠基土的质量含水率分别是24.78%、22.98%、24.05%,即天然含水率取三次数据的平均值为23.94%。天然含水率按式(1)计算。

$$\omega_0 = \left(\frac{m_0}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (1)$$

式中: ω_0 为天然含水率(%);为自然状态下土的质

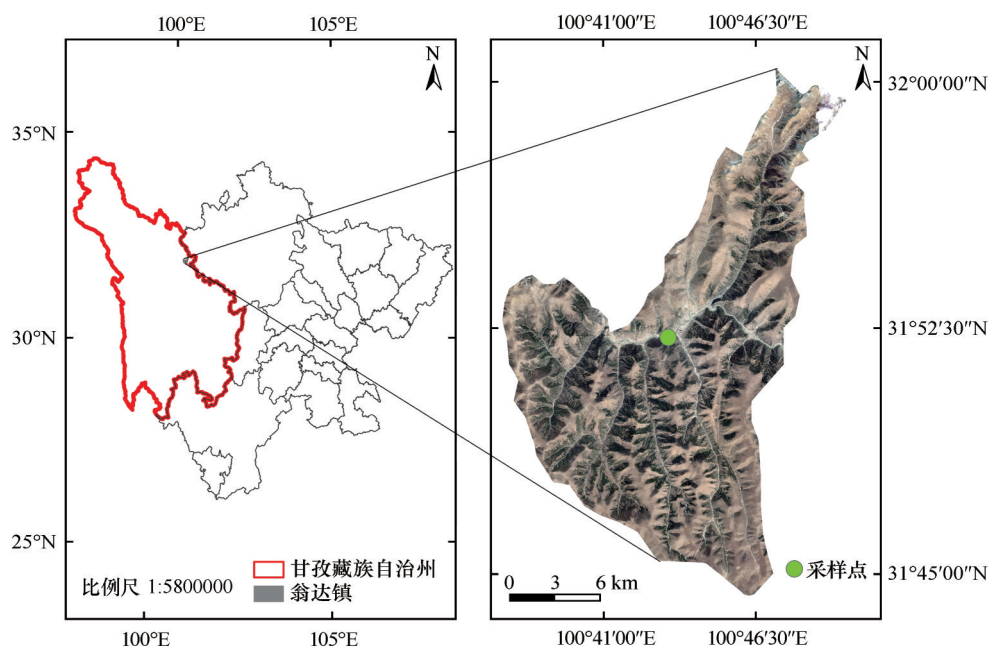


图1 研究地区地理位置

Fig. 1 The geographical location of the study area



图2 试验浅层土样

Fig. 2 Test topsoil sample

量(g); m_d 为烘干土质量(g)。

随之将该地取回的渠基土用烘箱在 105 ℃ 下烘干 8 h, 再将烘干后的渠基土碾碎成极小颗粒, 然后用 0.5 mm 国家标准检验筛过筛, 用精密电子天平(精度 0.01 g)称取 500 g 过筛后的土, 为液塑限试验备用。剩余烘干后的渠基土均过 2 mm 国家标准检验筛, 并将该重塑土样进行干密度、颗粒级配和液

塑限试验测定, 土样基本数据如表 1 所示。

1.2 混凝土衬砌试样制备

本研究制作了 4 种不同表面粗糙度的混凝土衬砌试块。为了将研究目标仅放在衬砌粗糙度上, 应尽量规避在剪切过程中由于衬砌表面构筑物与渠基土紧密接触时产生的摩擦效应, 因此本试验选用表面光滑, 8 mm 直径的玻璃珠构筑在混凝土衬砌表面。因为玻璃珠自身各向同性, 在各个方向、角度的物理化学性质稳定, 在剪切过程中不会出现类似砂砾、碎石子等出现可能阻挠剪切前进方向的情况, 因此将研究的唯一重点集中在粗糙度而尽可能规避掉构筑物与接触面间的摩擦效应。因此将衬砌表面玻璃珠总面积占接触表面面积的百分比来量化衬砌表面粗糙度大小这一指标, 将表面不作处理的混凝土的衬砌粗糙度定义为“无”, 其他 3 种衬砌表面分别埋置 2×2、3×3、5×5 颗玻璃珠, 即 4、9、25 颗玻璃珠, 为忽略玻璃珠排布对试验结果的影响, 固定各颗玻璃珠之间的距离一致, 并将各颗玻璃珠在混凝土衬砌表面埋置深度为玻璃珠直径一半的长度, 因此一颗玻璃珠的在衬砌表面的面积用公式(2)计算。

表1 土样基本物理性质参数

Table 1 Basic physical property parameters of soil samples

| 土质类型 | 不同粒径(mm)的质量百分比/% | | | | 干密度/(g·cm ⁻³) | 塑限/% | 液限/% |
|------|------------------|------------|----------------|-----------|---------------------------|-------|-------|
| | ≥2 mm | ≥0.05~2 mm | ≥0.075~0.05 mm | <0.075 mm | | | |
| 粉质黏土 | 0 | 17.12 | 67.78 | 15.10 | 1.74 | 29.70 | 17.80 |

$$S = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad (2)$$

式中: S 为一颗玻璃珠在混凝土衬砌上所占表面积(mm²); d 为一颗玻璃珠直径(mm)。

按公式计算, 即 2×2 颗、3×3 颗、5×5 颗玻璃珠在混凝土表面所占面积比分别为 6.70%、15.08%、41.89%, 并将它们的表面粗糙度分别定义为粗糙度“较低”“中等”“较高”, 同时将表面无玻璃珠的混凝土衬砌粗糙度定义为“无”。

依据剪切仪下剪切盒的对应比例面积(与普通环刀钝面表面积一致), 在环刀内部填充多个试样土柱使土柱底圆面积为 30 cm², 土柱高度为 2 cm, 因此每个土柱体积为 60 cm³, 填充完毕后在环刀内侧涂抹润滑剂以降低养护期内非稳态流动混凝土与钢环内部的摩擦效应。另外, 制作的混凝土衬砌试件材料一致采用细砂、直径 3~5 mm 细砾石和普通硅酸盐水泥, 具体的制作用料如图 3。其中水、细砾石、普通硅酸盐水泥和细砂的拌合比为 1:1:1.5:2,

并均匀拌合浇灌到环刀内部, 用砂板将表面不做任何处理的混凝土衬砌的两个接触面填涂平整, 并仔细填补在衬砌表面出现的凹凸区域, 然后将其维护 28 d 后用油压千斤顶从环刀顶出以备后续试验使用, 混凝土试样强度为 C25。

同上所述, 制作表面有粗糙度的混凝土衬砌时, 将玻璃珠按照近似方形的位位置整齐埋置于混凝土表面, 并将在埋置过程中溢出的流态混凝土涂抹平整, 同样将其养护 28 个龄期后用油压千斤顶取出后作试验备用。其中不做处理、衬砌表面粗糙程度较低、中等和较高的混凝土衬砌如图 3 所示。

1.3 直剪试验设置

为了探究不同衬砌粗糙度对接触面抗剪强度的影响效果, 结合当地土样在负温月份平均温度、天然含水率以及冰膜冻结稳定后的时间, 因此将环境温度设为 -5 ℃, 含水率设为 24%, 冻结时长设为 12 h 在衬砌粗糙度分别为“无”“较低”“中等”“较高”

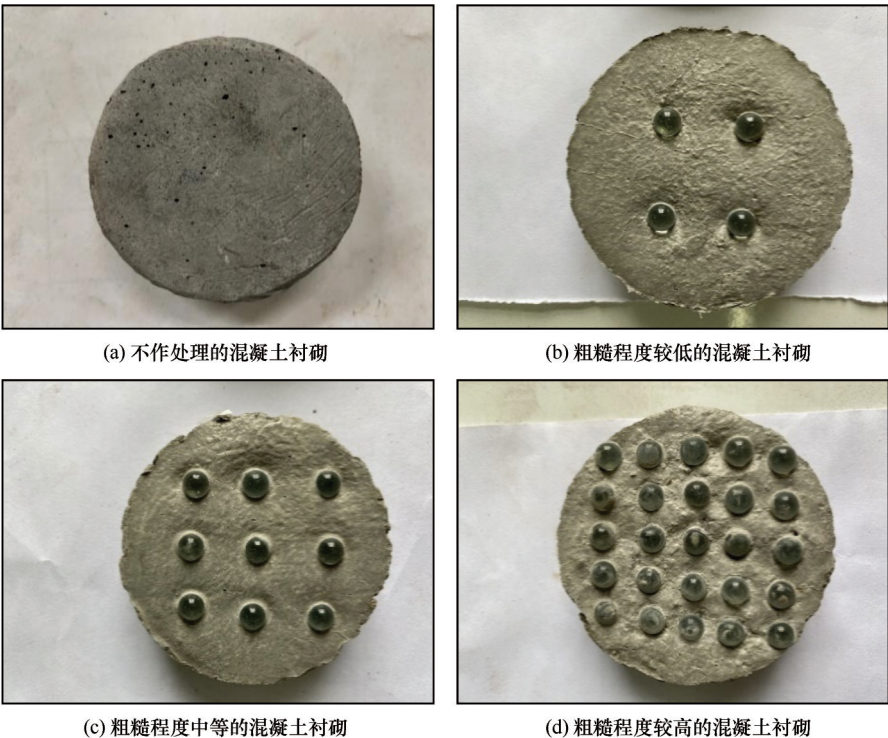


图3 不同处理下的混凝土衬砌

Fig. 3 Concrete lining under different treatments; untreated concrete lining (a); concrete lining with a low roughness (b); concrete lining with a medium roughness (c); concrete lining with a high roughness (d)

时进行土-衬砌接触面的直剪试验。

本次直剪试验为防止室外及周围环境温度较高使得剪切盒内部温度上升导致试验中接触面间冰膜受热扰动影响较大以致试验产生较大误差,因此本试验在冬季最冷月份下进行。试验前将“渠基土-衬砌试样”和剪切仪下的剪切盒在试验设置的负温下进行冻结,其中“渠基土-衬砌试样”单独置于冷柜底部(常温状态下和控温冷柜中的“渠基土-混凝土衬砌”试样如图4),待达到试验设置的冻结时长后将仪器和试样共同取出进行剪切试验。同时,试

验当中剪切仪选用“快剪模式”以减少室内外环境温度对试样中冰膜的温度干扰。为减少试验误差,每组参数设置相同的试验做3次平均试验,最终取3次平均试验的算术平均数为试验结果进行记录。

其中,剪应力按照公式(3)计算,不同时刻下所对应的剪切位移按照公式(4)计算,同时,为了忽略在两台及以上的试验仪器间进行试验存在较大试验误差,因此整个试验使用固定的一台剪切仪和固定的一个量力环(不同量力环的率定系数 c 不同,所得试验结果不同)进行试验。具体的剪切试验过程

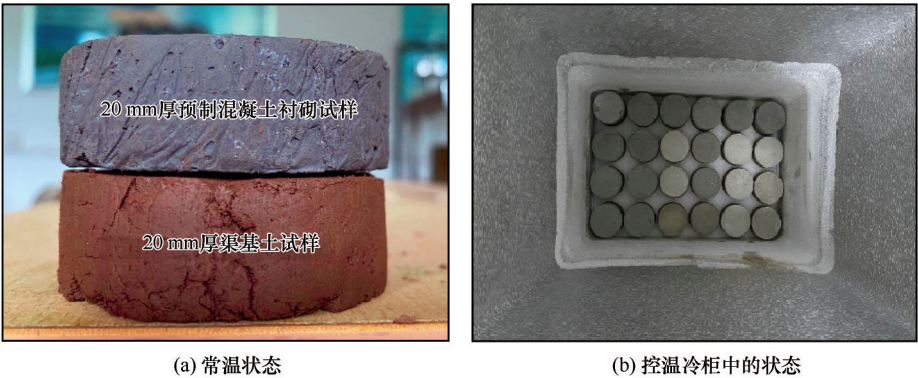


图4 不同状态下的“渠基土-混凝土衬砌”试样

Fig. 4 A “soil-concrete lining” sample under different conditions; normal temperature (a); state in temperature control freezer (b)

如图 5。

$$\tau = c \cdot R \quad (3)$$

$$\varepsilon = v \cdot t \quad (4)$$

式中: τ 为试验中不同剪切位移所对应的抗剪强度 (kPa); c 为量力环率定系数, 此量力环对应系数为 $1.886 \times 10^{-2} \text{ kPa} \cdot \text{mm}^{-1}$; R 为试验中量力环显示的实时读数 (mm); v 为剪切速率 (本台剪切仪快剪模式对应速率为 $2.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$); ε 为不同时刻下所对应的剪切位移 (mm); t 为对应的剪切时间 (s)。

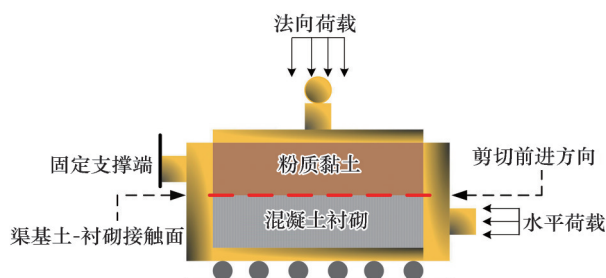


图5 剪切过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of shear process

2 结果与分析

2.1 衬砌粗糙度变化对接触面剪切特性的影响

2.1.1 不同衬砌粗糙度下所对应的剪应力-剪切位移变化

如图 6, 试验条件为环境温度 -5°C 、含水率 24%、冻结时长 12 h 和外部荷载 400 kPa 下对应的不同衬砌粗糙度的渠基土-混凝土衬砌接触面剪应力-剪切位移曲线图。由图可知, 剪应力值整体受衬砌粗糙度影响较大, 与不作处理衬砌的剪应力 207.46 kPa 相比, 粗糙程度较低、中等、较高衬砌分别对应的峰值抗剪强度为 230.09 kPa、281.01 kPa、326.28 kPa, 从数值上增加幅度较大。从达到峰值抗

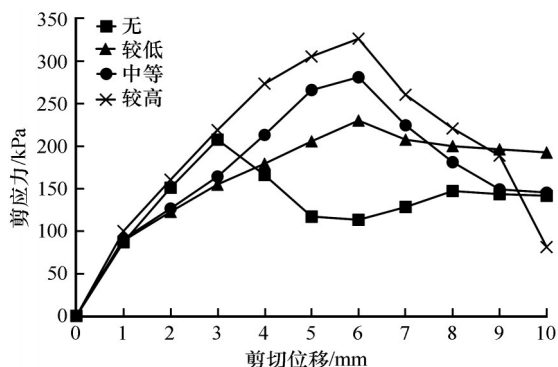


图6 不同衬砌粗糙度下剪应力-剪切位移曲线

Fig. 6 Shear stress-shear displacement curves with different lining roughness

剪强度的时间来看, 有粗糙度的较不作处理的更晚达到抗剪强度峰值, 即在剪切位移 6 mm 处达到最大。

与无粗糙度处理下的剪应力-剪切位移曲线区别的是, 经过粗糙处理试样的对应曲线在到达首次峰值抗剪强度时即产生应变软化效应, 随剪切位移的增加其剪应力值逐渐减小, 并且在达到首次强度峰值后即发生抗剪破坏, 不同于无粗糙度处理时会发生剪切滑移现象 (指曲线在达到首次剪切峰值后又随后续剪切进行时剪应力反而增大到剪切峰值的现象, 此现象多次往复出现在后续试验中)。

2.1.2 衬砌粗糙度变化对黏聚力、内摩擦角影响

以施加的外部荷载为横轴, 所得到的不同衬砌粗糙度下的峰值抗剪强度为纵轴, 即不同衬砌粗糙度下渠基土-混凝土衬砌接触面抗剪强度曲线如图 7。

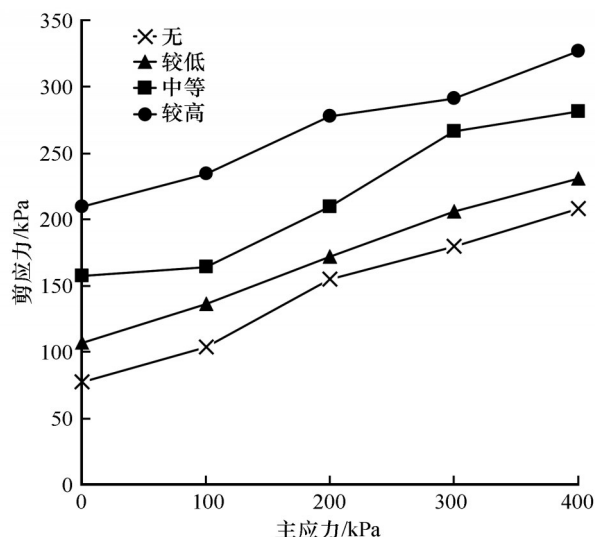


图7 不同衬砌粗糙度下接触面抗剪强度曲线

Fig. 7 Shear strength curve of contact surface under different lining roughness

如图 7, 不同衬砌粗糙度曲线的剪应力整体随主应力增大而增大。曲线整体大致呈线性变化, 排除试验误差, 随衬砌粗糙度变化各个阶段的增长速率大致相近。从所求得的剪应力大小来分析, 以施加外部荷载 400 kPa 为例, 较高衬砌粗糙度接触面的剪应力 326.28 kPa 较不作处理衬砌接触面的剪应力 207.46 kPa 差值最大达到 118.82 kPa, 由此判断衬砌粗糙程度是研究土-构筑物切向冻胀力问题中的一项不可忽略因素, 但具体对切向冻胀力的影响效果不明确, 还有待进一步分析探究。同时, 由该图得到的黏聚力、内摩擦角随衬砌粗糙度的变化如图 8。

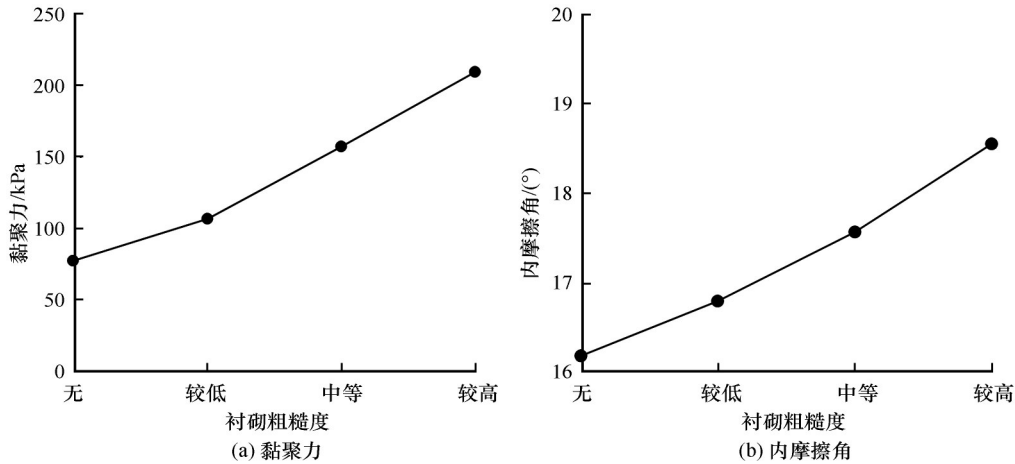


图8 不同衬砌粗糙度下黏聚力、内摩擦角变化曲线
Fig. 8 Curves of cohesion and internal friction Angle under different roughness of lining : cohesion (a); angle of internal friction (b)

如图8(a)、8(b)分别为不同衬砌粗糙程度下的黏聚力、内摩擦角变化曲线。曲线整体变化趋势相同,在随衬砌粗糙度越高,黏聚力与内摩擦角值也随之增大,其中内摩擦角增加幅度较黏聚力增加幅度不明显。从数值上分析,在较高衬砌粗糙度时,黏聚力达到4种不同条件试验下的最大值209.36 kPa,内摩擦角也达到最大值18.55°,整体而言数值上增加幅度的大小为剪切应力>黏聚力>内摩擦角。综上所述在渠系工程中加大衬砌面上的粗糙程度可大幅提高土与构筑物间的切向冻胀力已达到在负温月份防止灌渠冻胀破坏的较好效果。

2.2 各因素对峰值抗剪强度影响程度分析

为了进一步探究衬砌粗糙度与其他3种因素(环境温度、冻结时长、含水率)对接触面间峰值抗剪强度影响的相关性和显著性,因此针对本研究设计正交试验并分析对比试验结果。为使试验结果规律更为明显,外部荷载均采用400 kPa,即固定主应力值,探究其他4种因素对接触面间峰值抗剪强度影响特性的相关变化。

根据当地负温月份平均温度将环境温度设为0℃、-5℃、-10℃和-15℃;由于冰膜与两个接触面同时接触并达到相对冻结稳定至少需要冻结6 h,因此将冻结时长设为6 h、12 h、18 h、24 h;根据当地现场取样土的天然含水率将含水率设为18%、21%、24%、27%。正交试验中所设置的4种因素的主要参数梯度如表2所示。本研究正交设计采用国际通用的五因素四水平正交分析表,即L16(4⁵),为了尽量避免试验设计带来更多误差干扰,因此本设计中设误差列作为试验对照组,其中每个因素对应的水平

表2 正交因素试验表
Table 2 Orthogonal test factor level table

| 水平 | 环境温度 A/℃ | 冻结时长 B/h | 含水率 C/% | 衬砌粗糙 度D | 误差列E |
|----|-------------|-------------|------------|------------|------|
| 1 | 0 | 6 | 18 | 无 | |
| 2 | -5 | 12 | 21 | 较低 | |
| 3 | -10 | 18 | 24 | 中等 | |
| 4 | -15 | 24 | 27 | 较高 | |

及组合顺序如表3所示^[2]。
2.2.1 极差分析
极差分析表中所得最优水平、最优组合及影响的显著性如表4所示。从表中 $T_1 \sim T_4$ 分别代表4种不同因素在一个水平之和下的平均值,其中 $T_1 \sim T_4$ 的最大值减去最小值为该因素所得极差,极差的大小反应了该试验因素对峰值抗剪强度影响的相关性及显著性,极差越大影响关系越密切,反之则越不显著。从表中得到的结论可知衬砌粗糙度对峰值抗剪强度的影响最显著,其次是环境温度、含水率及冻结时长;并且从数值上分析,衬砌粗糙度的影响效应大于其他3个因素的影响效应之和。而每个因素 T 值中的最大值也代表了该因素的最优水平,将其组合为最优组合 $A_4B_4C_1D_4$ 。因此,理论上当条件满足环境温度为-15℃、冻结时长为24 h、含水率为18%、衬砌粗糙程度较高时能求得所有组合中峰值抗剪强度最大值。
2.2.2 方差分析
由于单一极差分析不能体现试验结果精确性,因此本研究增加方差分析减少试验误差。方差分析较极差而言能在多因素耦合的影响下更准确计

表3 试验结果正交表

Table 3 Orthogonal table of test results

| 试验编号 | 环境温度 $A/^{\circ}\text{C}$ | 冻结时长 B/h | 含水率 $C/\%$ | 衬砌粗糙度 D | 误差列 E | 峰值抗剪强度 $/\text{kPa}$ |
|------|---------------------------|-------------------|------------|-----------|---------|----------------------|
| 1 | 0 | 6 | 18 | 无 | 1 | 179.17 |
| 2 | 0 | 12 | 21 | 较低 | 2 | 198.03 |
| 3 | 0 | 18 | 24 | 中等 | 3 | 235.73 |
| 4 | 0 | 24 | 27 | 较高 | 4 | 305.53 |
| 5 | -5 | 6 | 21 | 较高 | 3 | 330.05 |
| 6 | -5 | 12 | 18 | 中等 | 4 | 286.67 |
| 7 | -5 | 18 | 27 | 较低 | 1 | 205.57 |
| 8 | -5 | 24 | 24 | 无 | 2 | 199.92 |
| 9 | -10 | 6 | 24 | 较低 | 4 | 179.17 |
| 10 | -10 | 12 | 27 | 无 | 3 | 164.08 |
| 11 | -10 | 18 | 18 | 较高 | 2 | 358.34 |
| 12 | -10 | 24 | 21 | 中等 | 1 | 309.30 |
| 13 | -15 | 6 | 27 | 中等 | 2 | 273.47 |
| 14 | -15 | 12 | 24 | 较高 | 1 | 373.43 |
| 15 | -15 | 18 | 21 | 无 | 4 | 247.07 |
| 16 | -15 | 24 | 18 | 较低 | 3 | 282.90 |

表4 极差分析表

Table 4 Range analysis

| 来源 | T_1 | T_2 | T_3 | T_4 | 极差 | 最优水平 | 最优组合 | 影响顺序 |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|----------------|------------------------|
| 环境温度 $A/^{\circ}\text{C}$ | 229.62 | 255.55 | 252.72 | 294.22 | 64.60 | 4 | | |
| 冻结时长 B/h | 240.58 | 255.55 | 261.67 | 274.41 | 33.89 | 4 | | |
| 含水率 $C/\%$ | 276.77 | 271.11 | 247.06 | 237.16 | 39.61 | 1 | $A_4B_4C_1D_4$ | 衬砌粗糙度 $D >$ 环境温度 A |
| 衬砌粗糙度 D | 197.56 | 216.42 | 276.29 | 341.84 | 144.28 | 4 | | $>$ 含水率 $C >$ 冻结时长 B |
| 误差列 E | 266.87 | 257.44 | 253.19 | 254.61 | 13.68 | | | |

算出各水平交互影响的差异性。此次方差分析采用 SPSS 22.0 来模拟五因素四水平正交试验结果,具体结果如表5所示。由方差设计表的具体规定可知,为了使方差设计可较好估计试验误差,必须满足该表的总自由度-模型自由度=误差自由度 >0 ,本设计为 $15-12=3>0$,符合要求。又引入显著特性概率值 P , $P<0.05$ 代表研究因素对峰值抗剪强度的影响具有一定相关性; $P\leq 0.01$ 代表研究因素对峰值抗剪强度的影响作用极其显著,是本研究结果的最相关因素。由表中结果可知,衬砌粗糙程度、环境温度、含水率对应的 P 值为 0.001、0.019、0.049,结果表明3种研究因素对峰值抗剪强度影响为强显著、一般性显著和弱显著。冻结时长 P 值为 0.103,由于 $0.103>0.05$,则冻结时长对于本研究的影响不具相关显著特性。

因此,结合极差和方差分析的综合结论表明,环境温度越低、冻结时间越长、接触面间含水率越低以及衬砌表面粗糙程度较高时所对应的峰值抗

剪强度越大。通过对比两表中的显著性 P ,得出当峰值抗剪强度达到最大时的最佳因素组合为 $A_4B_4C_1D_4$,而冻结时间对本研究无相关性显著影响效应,在后续研究中应着重考虑其他3种因素的变化。

2.2.3 最优水平组合试验验证

后续应结合现场直剪试验验证正交分析结果的可靠性,因此将最优组合 $A_4B_4C_1D_4$ 中4种因素所对应的水平进行3组平行试验验证,测得在该条件下所对应的峰值抗剪强度如表6所示。为了降低人为试验误差,在试验过程如实记录测得的样品实际环境温度、含水率和冻结时长(排除仪器干扰,一台仪器依次试验)。从表6中数据可以发现,3组平行试验最终得到的峰值抗剪强度分别为 373.43 kPa、380.97 kPa、377.20 kPa,均大于等于正交分析表(表3)中所有因素组合的峰值抗剪强度值,则正交分析表可信度较高。同时,在本研究中当温度 -15°C 、接触面间含水率 18%、衬砌表面粗糙程度越

表5 方差分析表
Table 5 Variance analysis

| 来源 | 平方和 | 自由度(df) | 均方(MS) | 统计量值(F) | 显著性(P) |
|----------|--------------------------|---------|----------------|------------|--------|
| 校正模型 | 66 284. 850 ^a | 12 | 5 523. 737 | 36. 472 | 0. 006 |
| 截距 | 106 5247. 956 | 1 | 1 065 247. 956 | 7 033. 559 | 0. 000 |
| 环境温度 A/℃ | 8 604. 911 | 3 | 2 868. 326 | 18. 939 | 0. 019 |
| 冻结时长 B/h | 2 385. 562 | 3 | 795. 187 | 5. 250 | 0. 103 |
| 含水率 C/% | 4 312. 417 | 3 | 1 437. 472 | 9. 491 | 0. 049 |
| 衬砌粗糙度 D | 50 981. 894 | 3 | 16 993. 965 | 112. 207 | 0. 001 |
| 误差列 E | 454. 357 | 3 | 151. 452 | | |
| 总计 | 1 131 987. 162 | 16 | | | |
| 校正后的总变异 | 66 739. 207 | 15 | | | |

注：校正模型平方和中的^a代表 $R^2=0.993$ （调整后的 $R^2=0.966$ ）。

表6 试验结果验证表
Table 6 Verification table of test results

| 试件编号 | 实测温度/℃ | 实际冻结时间/h | 实测含水率/% | 峰值抗剪强度/kPa |
|------|--------|----------|---------|------------|
| 1 | -14. 6 | 23. 8 | 17. 78 | 373. 43 |
| 2 | -15. 2 | 24. 0 | 18. 21 | 380. 97 |
| 3 | -14. 8 | 24. 2 | 17. 96 | 377. 20 |

高时峰值抗剪强度为最大值。

3 讨论

以往大量研究表明,冻土与构筑物间发生剪切破坏时会发生较大的剪切滑移,在剪切过程中剪应力-剪切位移曲线达到峰值抗剪强度后不会立刻发生应变软化进而导致剪应力迅速下降,而是在低温和外部荷载的驱动下,使得接触表面热量重分布,未冻水开始再次结晶形成冰膜发生应变硬化现象,但前人的结论大多是未考虑构筑物表面粗糙度所得出的结果。

以本研究为例,当混凝土衬砌表面存在均匀埋置的光滑玻璃珠时,比较容易发生土体孔隙中所流动的自由水在玻璃珠上冻结的现象,因此冰膜所发挥的胶结效应可能不如粗糙衬砌与冻土的咬合效应。并且在剪切过程中,由于接触面上存在大量玻璃珠,可以发生再胶结的土体面积减少,因此未冻水转化成冰膜的面积减少,随着衬砌粗糙度的增加,再难以发生冰膜的再胶结现象。综上分析,有粗糙度的衬砌接触面在剪切过程中较难发生二次及多次剪切高峰,但也不能完全消除残余抗剪强度效应,对此构筑物表面粗糙度对接触面间冻胀力学效应的影响较大,而与陈拓等^[15]所得含水率是影响

界面抗剪强度最大的因素结论相对比发现,本研究所选用的粉质黏土与混凝土衬砌之间的冻胀特性更敏感,咬合性更剧烈,再者本研究对于粗糙度的区分程度范围更广,导致试验过程中随粗糙度变化时接触面间的峰值抗剪强度会增大得越来越多,因此本研究中的此效应大于含水率对抗剪强度的影响效果。

相应地,在工程中为防止土体由于往复冻融作用所造成的形变破坏和不均匀沉降,可在经济允许的情况下,适当增加土体表面构筑物的粗糙程度以削弱冻胀融沉效应带来的工程灾害。

4 结论

(1)渠基土-混凝土衬砌接触面间的抗剪强度随衬砌粗糙程度增高而变大,当抗剪强度达到第一次峰值后发生应变软化,即达到剪切破坏,抗剪强度随剪切位移增加而不断减小,相同条件下所对应的黏聚力与内摩擦角的变化规律一致,都随粗糙程度增高而变大。

(2)从正交分析中4种因素对衬砌接触面峰值抗剪强度的影响强弱程度看,最相关因素为衬砌粗糙度,环境温度和含水率相关性依次递减,而冻结时长对本研究结果的影响不具显著性,不是本研究的相关因素。

(3)当环境温度-15℃,含水率18%,衬砌粗糙度较高时,即低温、低含水率以及衬砌粗糙度较高时的峰值抗剪强度达到最大。

参考文献(References):

[1] Liu Furong, Ma Wei, Zhou Zhiwei, et al. Characteristics of deformation and stress variation of channel soil under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,

- 2021, 43(2): 523-534. [刘富荣, 马巍, 周志伟, 等. 渠基土在冻融循环作用下的变形和应力变化特征[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 523-534.]
- [2] Ma Xiaohan, Xue Ke, Liu Jianping, et al. Study on ice cementation strength of silty clay-lining interface in western Sichuan [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(4): 90-96. [马小涵, 薛珂, 刘建平, 等. 川西粉质黏土-衬砌接触面冰胶结力规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(4): 90-96.]
- [3] Huang Yongting, Ma Wei, He Pengfei, et al. Experimental study on thawing and settling process of frozen soil under different loading conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1): 184-194. [黄永庭, 马巍, 何鹏飞, 等. 不同荷载条件下冻土融化沉降过程试验研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 184-194.]
- [4] He Pengfei, Ma Wei, Mu Yanhu, et al. Experimental study on the effect of freezing-thawing cycle on the ice cementation strength of frozen soil and concrete interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 299-307. [何鹏飞, 马巍, 穆彦虎, 等. 冻融循环对冻土-混凝土界面冰胶结力影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 299-307.]
- [5] Zhang Dong, Guo Xuan. Analysis of thermal insulation and anti-frost heave effect of composite lining channel with irrigation and silt soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(21): 122-129. [张栋, 郭璇. 灌溉冻土复合衬砌渠道保温防冻胀效果分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 122-129.]
- [6] Zhang Wenqiang, Niu Yonghong. Numerical simulations on cutting of frozen soil using HJC Model[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2020, 12(3): 134-143.
- [7] Wu Qingbai, Niu FuJun. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(10): 1079-1094.
- [8] He Pengfei, Ma Wei, Mu Yanhu, et al. Characteristics and formation mechanism of ice cementation force in frozen soil and Concrete Interface[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(23): 127-133. [何鹏飞, 马巍, 穆彦虎, 等. 冻土-混凝土界面冰胶结力特征与形成机理研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 127-133.]
- [9] Chen Liangzhi, Wen Zhi, Dong Shengshi, et al. Study on constitutive model of interface between frozen silt and FRP in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(2): 402-408. [陈良致, 温智, 董盛时, 等. 青藏冻结粉土与玻璃钢接触面本构模型研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 402-408.]
- [10] Ma Wei, Niu Fujun, Mu Yanhu. A study on the characteristics of permafrost in the Tibetan Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(11): 1185-1191. [马巍, 牛富俊, 穆彦虎. 青藏高原重大冻土工程的基础研究[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1185-1191.]
- [11] Wang Pingsheng, Zhou Guoqing. Frost-heaving pressure in geotechnical engineering materials during freezing process[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(2): 287-296.
- [12] Wang Zhengzhong. Study on mechanical model of frost heaving damage of concrete lining in trapezoidal canal[J]. Agricultural Engineering Journal, 2004(3): 24-29. [王正中. 梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J]. 农业工程学报, 2004(3): 24-29.]
- [13] Liu Hongxu. Discussion on the Distribution of tangential frost heaving Force along the side surface of pile[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993(2): 289-292. [刘鸿绪. 对切向冻胀力沿桩侧表面分布的探讨[J]. 冰川冻土, 1993(2): 289-292.]
- [14] Sun Houchao, Yang Ping, Wang Guoliang. Development and application of mechanical test system for the interface between frozen soil and structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3636-3641+3643. [孙厚超, 杨平, 王国良. 冻土与结构接触界面层力学试验系统研制及应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3636-3641+3643.]
- [15] Shi Quanbin, Yang Ping, Sun Houchao. Multifunctional improvement and experimental study of frozen soil direct shear apparatus[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2017, 45(5): 457-463. [石泉彬, 杨平, 孙厚超. 冻土直剪仪多功能改进与试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 457-463.]
- [16] Chen Tuo, Zhao Guangsi, Zhao Tao. Experimental study on ice cementation strength of interface between clay and structure in cold region[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018, 40(3): 512-518. [陈拓, 赵光思, 赵涛. 寒区黏土与结构接触面冰胶结力特性试验研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(3): 512-518.]
- [17] Hu Yuan, Xu Zhen, Wang Pengfei, et al. Study on frost heaving and thawing settlement of soil around gas pipeline in permafrost area[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(4): 1035-1042. [胡渊, 徐震, 汪鹏飞, 等. 冻土区输气管道周围土体冻胀融沉研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 1035-1042.]
- [18] Sun Chao, Shao Yanhong, Wang Wendong. Research progress and thinking on horizontal frost heaving force of retaining structures[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(3): 784-798. [孙超, 邵艳红, 王寒冬. 支挡式结构物水平冻胀力研究进展与思考[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(3): 784-798.]
- [19] Zhang Saize, Bian Hanbing, Dong Xiaohua, et al. Experimental study on direct shear of frozen contact surface of soil-concrete lining under channel[J]. South-to-North Water Diversion and water conservancy science and technology, 2017, 15(5): 164-169. [章赛泽, 卞汉兵, 董小花, 等. 渠道下卧土-混凝土衬砌冻结接触面直剪试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 164-169.]
- [20] Chou Yaling, Wang Lijie. Seasonal freezing-thawing process and hydrothermal characteristics of soil on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(11): 3082-3098.
- [22] Li Guoyu, Ma Wei, Mu Yanhu, et al. Research progress and prospect of collapsibility characteristics of compactable loess in seasonal permafrost region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 934-943. [李国玉, 马巍, 穆彦虎, 等. 季节冻土区压实黄土湿陷特性研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 934-943.]
- [22] Mu Yanhu, Li Guoyu, Yu Qihao, et al. Research on heat transfer process and cooling effect prediction of cone-column pile foundation under heat pipe[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 106-117. [穆彦虎, 李国玉, 俞祁浩, 等. 热管措施下锥柱式桩基础传热过程及降温效果预测研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 106-117.]

Impact of lining roughness on peak shear strength of soil-lining interface in seasonal frozen zone

MA Xiaohan^{1,2}, XUE Ke¹, GAO Qiang³, ZHANG Mingli⁴, LIU Jianping¹,
XIE Jun¹, XIANG Qing², YANG Mingdong²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625000, Sichuan, China;

2. College of Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 3. State Key Laboratory of Frozen Soil

Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

4. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 710050, China)

Abstract: Based on predecessors in the soil structure and the surface roughness affect the soil-structure of contact area between the tangential frost heaving force research is less, this study starts from the problem of tangential frost heaving force between soil-lining contact surfaces of canal foundation in western Sichuan seasonal frozen area, and focuses on the influence law and effect of surface roughness of lining on shear strength, cohesion and internal friction angle between contact surfaces. Combined with environmental temperature, moisture content and freezing time, the correlation and aboriginality of four factors on peak shear strength between contact surfaces are comprehensively explored by orthogonal analysis. The results show that the peak shear strength, cohesion and internal friction angle between the contact surfaces show the same law with the change of lining surface roughness, and the more rough the lining surface is, the three indexes will increase. The orthogonal analysis reveals that the most significant factor affecting the peak shear strength between the contact surfaces is the roughness of the lining, followed by environmental temperature and moisture content, and the effect of freezing time is not obvious. At the same time, the peak shear strength under low temperature, low moisture content, long freezing time and high roughness of the lining is larger. This result can provide theoretical support for the frost heaving hazard prevention of canal system engineering in seasonal frozen region.

Key words: seasonal frost area; channel foundation soil-lining interface; roughness of lining; peak shear strength

(责任编辑: 裴万胜)