

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0050

SUN Zhaohui, BIAN Hanbing, WANG Chenyu, et al. Significance analysis of factors of freezing strength between silty clay and concrete lining [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):508-514. [孙兆辉, 卞汉兵, 王宸宇, 等. 粉质黏土-混凝土衬砌接触面冻结强度影响因素显著性分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):508-514.]

粉质黏土-混凝土衬砌接触面冻结强度 影响因素显著性分析

孙兆辉¹, 卞汉兵^{1,2}, 王宸宇¹, 鹿翔宇¹, 邱秀梅¹

(1. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 里尔大学 土木工程与岩土环境实验室, 法国 里尔 59655)

摘 要: 冻土与结构接触面的力学性能对寒区工程研究具有重要意义, 容易受到外界因素干扰。为研究不同因素对粉质黏土与混凝土衬砌接触面冻结强度的影响, 设计考虑含水率、冻结温度、冻结时间的三水平正交直剪试验。试验结果表明: 在冻结初期, 提高土体含水率, 降低冻结温度, 延长冻结时间有利于接触面早期冻结强度的提升, 且这种作用效果是线性的。基于显著性分析理论, 发现含水率、冻结温度、冻结时间对接触面早期冻结强度的显著性等级均为极显著, 三者之中, 冻结温度影响最大, 含水率影响最小。采用多元线性回归, 忽略因素之间的二阶交互作用, 建立了考虑含水率、冻结温度、冻结时间作用的粉质黏土与混凝土接触面的冻结强度预测模型, 为类似工程提供科学参考。

关键词: 接触面; 冻结强度; 直剪试验; 显著性分析; 回归分析

中图分类号: TU411.7; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0508-07

0 引言

我国北方地区, 冬季严寒, 渠系工程面临严重的冻害问题。在负温环境中, 填充于土壤孔隙中的水遇冷会凝结成冰, 在一定情况下, 将导致土体发生冻胀变形。在此过程中, 渠基土与衬砌的冻结接触面将承受、传递变形引起的荷载, 而当荷载超出接触面冻结强度或是上部衬砌结构的承载能力时, 渠系结构将会出现各类破坏形态^[1]。李甲林^[2]研究得到渠底衬砌损坏取决于法向冻胀力作用, 而边坡衬砌破坏则主要与切向冻结力有关, 一旦超出其承载能力, 便会出现局部隆起架空、坍塌破坏等冻害现象。由此可见, 切向冻结力是研究边坡冻害问题的关键。探明多因素对土与结构接触面冻结强度的作用, 对研究此类问题具有重要意义。

国内外学者在土与结构接触面冻结强度方面, 开展了众多研究。依据不同材料相互接触的直剪

试验结果, Choi等^[3]认为接触面的切向冻胀力可由抗剪强度预测得出, 并在后来的试验研究中, 得出了有效的预测方法。温智等^[4-5]在研究青藏粉质黏土与结构接触面的力学性质时, 将直剪试验所得的冻土与结构接触面的抗剪强度等效为冻结强度, 分析了冻结温度、含水率等因素对高温冻土与玻璃钢接触面冻结强度的影响。吕鹏等^[6]借助低温动荷载直剪装置, 开展了粗颗粒土与结构接触面的直剪试验研究, 与其他学者一致, 认为土质也是影响冻结接触面的抗剪强度重要因素之一^[7]。吉延峻等^[8]在冻土与现浇混凝土接触面的直剪试验中, 通过调整水灰比的方式, 控制接触面的粗糙程度, 发现粗糙接触面的冻结强度大于光滑接触面, 摩擦角与胶结力对冻结强度的贡献比会随接触面的粗糙程度产生变化。

虽然上述研究成果丰富, 但未能将各因素对接

收稿日期: 2018-08-15; 修订日期: 2019-06-28

基金项目: 山东省重点研发计划项目“渠道衬砌冻融破坏机理与工程防治措施研究”(2017GSF16104); 国家十二五科技支撑计划项目“南水北调平原水库运行期健康诊断及防护技术与示范”(2015BAB07B05)资助

作者简介: 孙兆辉(1991-), 男, 山东泰安人, 2015年在中南林业科技大学获得学士学位, 现为山东农业大学在读硕士研究生, 从事冻土力学性质研究. E-mail: Mrsunzhaohui@163.com

通信作者: 邱秀梅, 教授, 从事土体安全工程研究. E-mail: qxmrx@126.com.

触面冻结强度影响程度进行量化,因此,很难直观地从试验结果中比较出各因素对接触面冻结强度的影响强弱。关于多影响因素的试验研究方面,利用设计正交试验方案,往往能够减少试验次数,获取较好的结果^[10]。结合适当的分析方法,可以有效地完成对多不同影响因素的量化分析。近年来,已有部分学者将显著性分析理论引入冻土力学性质的研究。李顺群等^[10]认为冻土的力学性质除了受各因素单独作用之外,因素之间的交互作用也不可忽视。常丹等^[11]开展了冻融作用下粉砂土的三轴试验研究,发现粉砂土的力学性质受冻融循环次数与围压、冻结温度的交互作用影响显著,同样认为影响因素之间的交互作用需要加以考虑。然而,上述显著性研究皆是以冻土为研究对象,鲜有涉及多因素作用下冻土与结构接触面力学性质的研究。特别是关于土与结构接触面冻结强度预测模型仍有待进一步研究,而回归分析或许可成为一种解决方案^[12]。

本研究以位山灌区渠基粉质黏土与混凝土衬砌为试验材料,选择含水率、冻结温度、冻结时间3个典型因素,开展粉质黏土与混凝土冻结状态下的直剪试验研究。基于考虑因素之间交互作用的显著性理论,完成对接触面冻结强度影响因素的显著性分析。采用多元线性回归分析,建立了接触面冻结强度的预测模型,对实际工程具有参考价值。

1 试验介绍

1.1 试验材料及设备

供试土样与混凝土衬砌均为位山灌区工程用料,预先将混凝土衬砌加工成直径61.8 mm,厚度20 mm的圆饼。根据《土工试验方法标准》,完成土的筛分实验、液塑限实验,获得供试土样的基本参数,见表1。试验所用的设备主要包括:电动液压脱模器、可控温冷冻存储箱、等应变控制式直剪仪。

表1 供试土样的基本参数
Table 1 The parameters of the test soil

土质分类	塑限/%	液限/%	塑性指数/%	最优含水率/%	最大干密度 /(g·cm ⁻³)	土粒粒径(mm)分布/%			
						≥0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005
粉质黏土	21.38	33.53	12.15	16.7	1.67	7.18	37.68	46.19	8.7

1.2 试验方案

采用正交试验方案,选取土体初始含水率、冻结温度、冻结时间3个影响因素,每个因素各设3个水平,试验样本共计27组,具体方案见表2。为了有效控制土的初始含水率,使用喷雾器进行定量喷水,将充分拌和好的土样,进行先密封后隔夜处理。使用电动液压装置完成土样压模,控制土样的干密度约为最大干密度。试样装盒时,将混凝土试件与土样依次压入剪切盒中。最后,将制备好的试样放入可控温冷冻存储箱中进行低温冻结。直剪试验在山东农业大学低温实验室进行(最低温为-50℃,控制精度为1℃),实验室工作温度按照试样的冻结温度进行设定,待室温恒定后,开始法向应力为100 kPa,剪切速率为2.4 mm·min⁻¹的直剪试验。

表2 正交试验方案

Table 2 Orthogonal test scheme

水平数	1	2	3
含水率A	14%	16%	18%
冻结温度B	-5℃	-10℃	-15℃
冻结时间C	3 h	6 h	9 h

含水率按照线性拟合。由图可见,R²最大为0.999,最小为0.982。试验表明接触面的冻结强度与含水率具有很强的线性相关性,且冻结强度会随含水率的增大而线性增强。这是由于土体含水率增加,土中孔隙水含量增大,负温作用下更易析出结晶,土与混凝土之间的冰晶数量将同比增加,胶结强度加强,表现为接触面的冻结强度提高。

图2为冻结温度对接触面冻结强度的影响,同样,采取线性拟合的方式对试验数据加以处理。图中,R²最大为0.999,最小为0.979。结果表明接触面的冻结强度与冻结温度同样存在很强的线性相关性,冻结强度会随冻结温度绝对值的增大而线性提高。冻结温度对接触面冻结强度的影响,可以归结为:温度降低有利于冰晶强度的提高,促

2 试验结果分析

2.1 3个因素对接触面冻结强度的影响

粉质黏土与混凝土接触面冻结强度与初始含水率的变化关系如图1所示,将接触面冻结强度与

使接触面上的冰晶可以更好地发挥胶结作用, 提供更大的冰胶结力。同时, 温度降低还会影响冻土中未冻水含量, 事实上, 土体在冻结状态下, 仍存在部分未冻结水, 且会随冻结温度的降低而非

线性减少。与之相反, 接触面上生成的冰晶数量将会同步增加。值得肯定的是, 冰晶数量的增加与强度的增强, 对接触面冻结强度的提升都起到促进作用。

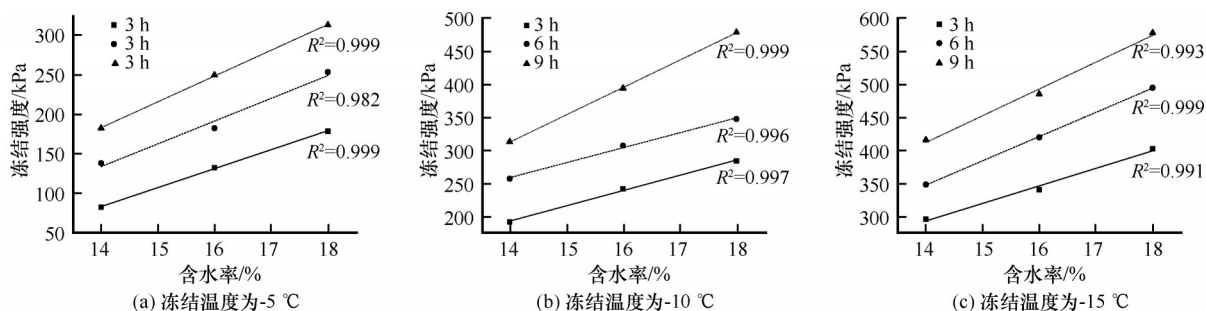


图1 冻结强度随含水率的变化

Fig. 1 Freezing strength vs. water content

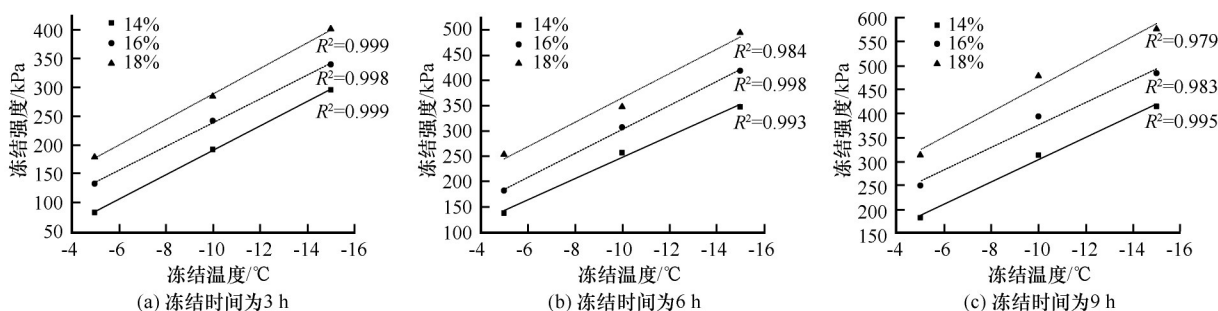


图2 冻结强度随冻结温度的变化

Fig. 2 Freezing strength vs. freezing temperature

图3为冻结时间对接触面冻结强度的影响。在9组线性拟合结果中, R^2 最大为0.999, 最小为0.961, 表明接触面的冻结强度与冻结时间也具有好的线性相关性, 即冻结强度随冻结时间的增长而增强。其原因是: 试样的冻结过程属于渐变的过程, 从热力学角度进行瞬态热分析, 试样的冻结过程为热量由内部向外部传递, 进而使整体温度逐渐趋于稳定的过程。该过程可被理解为: 由

于试件外部温度低于内部, 外部土体先达到冻结点, 部分孔隙水发生结晶, 率先产生一定的冻结强度。随着冻结时间的延长, 已冻结土体的温度继续降低, 逐渐趋近设定冻结温度, 而未冻结的土体也开始发生冻结, 促使接触面冻结强度进一步提升。当土体完全冻结, 与环境温度达到平衡时, 接触面的冻结强度也随之达到最大值, 不再随冻结时间而变化。

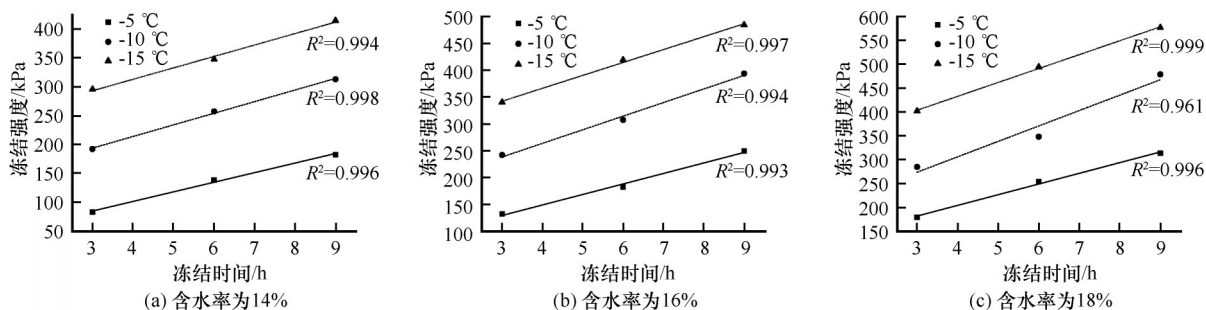


图3 冻结强度随冻结时间的变化

Fig. 3 Freezing strength vs. freezing time

2.2 考虑因素之间交互作用的显著性分析

采用考虑因素之间交互作用的显著性分析理论，记总平方和 R 与矫正数 ψ 分别为：

$$R = \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 x_{ijk}^2 \tag{1}$$

$$\psi = (\sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 x_{ijk})^2 / 27 \tag{2}$$

式中： i, j, k 分别对应含水率A、冻结温度B、冻结时间C这3个因素的相应水平值，且 $i, j, k \in \{1, 2, 3\}$ ； x_{ijk} 为对应下标试验组的冻结强度值。

因为，不同因素的变差平方计算公式具有一定相似性，现分别列出不考虑交互作用(以含水率为例)与考虑交互作用(以冻结温度与冻结时间的交互为例)的计算公式：

$$\begin{cases} S_A = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^3 (\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 x_{ijk})^2 - \psi \\ S_{BC} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 (\sum_{i=1}^3 x_{ijk})^2 - S_B - S_C - \psi \end{cases} \tag{3}$$

总变差平方和 S_T 与误差变差平方和 S_E 分别记为：

$$S_T = R - \psi \tag{4}$$

$$S_E = S_T - S_A - S_B - S_C - S_{AB} - S_{BC} - S_{AC} \tag{5}$$

记方差估计值 F 为：

$$F_X = (S_X/f_X)/(S_E/f_E) \tag{6}$$

式中： X 表示试验因素； f_X 表示因素自由度； f_E 表示误差自由度。引入 F 检验(也称“联合假设检验”)，完成对各因素的显著性分析。其判断依据为：当某因素的 F 值大于表3中的临界值 F_α 时，则表示该因素已达到对应的显著水平。依据显著性水平将显著性等级由高到低，划分为I~V级，见表4。对于同时达到多个显著性水平的因素，记录其最高显著性等级，见表5。

表3 F 检验临界值表 $F_\alpha(f_1, f_2)$

Table 3 F test critical values $F_\alpha(f_1, f_2)$

显著性水平 α	0.05	0.01	0.005	0.001
$f_1=2, f_2=8$	4.46	8.65	11.04	18.49
$f_1=4, f_2=8$	3.84	7.01	8.81	14.39

显著性分析表明：各因素对粉质黏土与混凝土接触面冻结强度的显著性等级差别很大。其中，土体初始含水率、冻结温度与冻结时间对接触面冻结强度的影响极显著，而3个因素两两交互作用的显著性等级最高为IV级，最低为V级，意味着含水率、冻结时间、冻结温度之间的二阶交互作用不会

对接触面冻结强度产生影响。3个因素之中，又以冻结温度的影响最大，含水率最小。

表4 显著性等级

Table 4 Significance levels

显著性水平 α	显著性等级	显著性符号
$\alpha \leq 0.001$	极显著	I
$0.001 < \alpha \leq 0.005$	显著	II
$0.005 < \alpha \leq 0.01$	一般	III
$0.01 < \alpha \leq 0.05$	弱显著	IV
$0.05 < \alpha$	不显著	V

表5 考虑因素之间交互作用的显著性分析结果

Table 5 Significance analysis results of factors

因素	自由度 f	变差平方和 S	F	显著性等级
含水率A	2	67 720.035	332.731	I
冻结温度B	2	118 243.523	1 161.939	I
冻结时间C	2	43 971.693	432.095	I
A×B	4	153.702	1.510	V
B×C	4	371.599	3.652	V
A×C	4	575.262	5.653	IV
误差E	8	101.764		
总和	26	397 366.830		

2.3 回归分析

利用MATLAB完成相关性分析，其相关系数矩阵如图4所示。

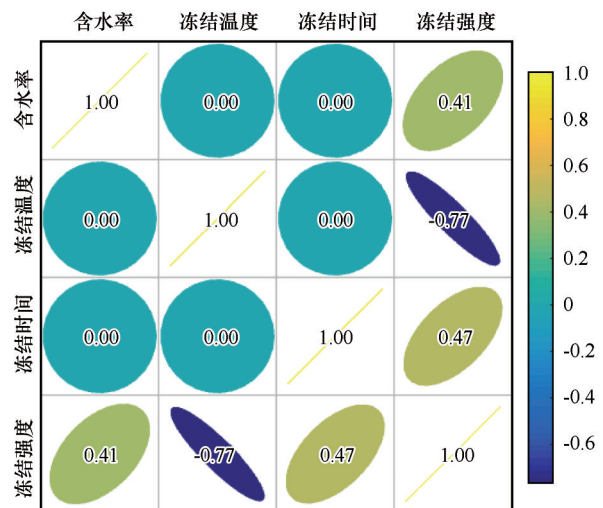


图4 相关系数可视化矩阵

Fig. 4 Correlation coefficient visualization matrix

图4中相关系数的大小反映出各因素之间相关性的强弱，完全相关记为1，完全无关记为0。正负表示因素之间相关性的正负。由图可见，冻结温度

与含水率、冻结时间均为正相关，与冻结温度为负相关，而3因素之间的相关性为0，因此，可以选用多元线性回归分析，记回归方程为：

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \tag{7}$$

式中：因变量y为冻结强度，自变量x对应显著性等级为Ⅰ级的影响因素，回归系数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 由数据拟合得到，计算结果见表6。

表 6 回归系数

Table 6 Regression coefficient

估计变量	β 估计值	标准误差	t统计量	P值
常量	-551.502	31.708	-17.393	9.912e ⁻¹⁵
含水率	30.658	1.860	16.484	3.118e ⁻¹⁴
冻结温度	-22.905	0.744	-30.790	3.373e ⁻²⁰
冻结时间	23.290	1.240	18.784	1.889e ⁻¹⁵

注：样本数量：27，误差自由度：23；均方根误差：15.8； $R^2=0.986$ ，调整后 $R^2=0.984$ ；F统计量 vs. 常数模型：524，P值=2.63e⁻²¹。

将回归系数的拟合值带入回归方程，并用w、 θ 、t代替 x_1, x_2, x_3 ，得回归方程为：

$$y = 30.658w - 22.905\theta + 23.29t - 551.502 \tag{8}$$

式中：y为接触面的冻结强度；w为土体初始含水率； θ 为冻结温度；t为冻结时间。

图5为回归模型预测结果与试验值的关系图，由图可见，预测值与试验值较为吻合。表6计算P值为2.63e⁻²¹ < 0.05，证明该回归方程的可靠程度具有超过95%的保证率，该模型可在实际工程中应用。

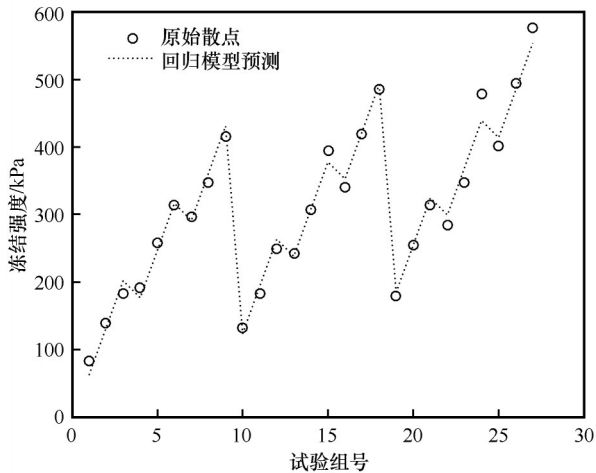


图 5 回归模型预测结果

Fig. 5 Predicted value vs. test value

3 讨论

在负温环境下，土体中的孔隙水发生结晶，在

土与混凝土接触面上，同样也会有冰晶析出，通过胶结作用，将土与混凝土冻结起来，并形成一层薄薄的冰膜，且具有一定的强度，可以抵抗剪切变形作用。土与结构接触面的冻结强度既受接触面上的冰晶的冰胶结力作用，还受到摩擦力作用。因为摩擦力与混凝土表面的粗糙度有关，接触面越光滑，摩擦角对冻结强度的贡献越小，黏结强度贡献越大^[8]。而本试验中使用的混凝土块试件都被加工成表面光滑的，且剪切后没有明显的表面损伤，因此，我们假设在整个试验过程中表面粗糙度是恒定的，再对接触面的冻结强度分析时，可以忽略接触面的粗糙度，仅考虑冰胶结作用的影响。事实上，冻结过程属于渐变过程，可以将该过程划分为局部冻结、整体冻结、完全冻结三个阶段。局部冻结即先到达冻结点的土体率先冻结，特点是冻土与融土共存；整体冻结即在温度梯度作用下，所有融土均发生冻结，冻土温度继续降低，特点是只有冻土，但存在温度梯度；完全冻结即冻结过程的最终状态，土体全部冻结，内部也不存在温度梯度。理论上，接触面的冻结强度不可能随冻结时间无限提升，结合试验结果，可以判断本研究区间为粉质黏土与混凝土接触面的冻结初期。

采用F检验法，对试验因素进行显著性排序。相同自由度的因素之间，可以根据F值的大小直接比较其显著性高低；不同自由度的因素之间，需要依据显著性等级进行判断。研究发现：接触面的冻结强度与土体初始含水率、冻结时间、冻结温度均有显著的相关性。冻结强度与土体初始含水率和冻结时间呈正相关，其原因是初始含水率的增加、冻结时间的增长，都利于接触面上析出更多冰晶，进而提高冻结强度。在粉质黏土与混凝土冻结初期，冻结时间的F值略大于含水率的F值，表明冻结时间对接触面冻结强度的作用更显著，换言之，增加冻结时间比提高含水率更容易使接触面获得早期冻结强度。对于长期冻结强度，仍有待进一步研究。与同类研究结果一致，冻结强度与冻结温度呈负相关，冻结温度降低，冻结强度线性提高。其主要原因是冻结温度直接影响接触面上冰晶的数量和胶结强度，这或许是冻结温度对冻结强度影响最为显著的原因。

4 结论

采用室内试验的研究方法，开展不同土体初始

含水率、冻结温度、冻结时间的正交直剪试验, 综合分析了3个因素及其二阶交互作用对粉质黏土与混凝土接触面冻结强度的影响, 得出结论如下:

(1) 在粉质黏土与混凝土冻结初期, 通过提高土体含水率, 降低冻结温度, 延长冻结时间的方式, 可以使接触面的早期冻结强度得到线性提升。

(2) 土体初始含水率、冻结温度与冻结时间对接触面早期冻结强度影响为极显著, 而任意两者的交互作用影响微弱, 基本可以忽略。

(3) 采用多元线性回归分析方法, 建立了考虑含水率、冻结温度、冻结时间的粉质黏土与混凝土接触面冻结强度的预测模型, 且方程满足显著性要求, 对实际工程具有借鉴意义。

本研究通过设计正交试验方案, 对3个因素作用下粉质黏土与混凝土接触面冻结强度的成因进行了定性分析。结合显著性分析方法, 利用 F 检验, 完成了对影响接触面冻结强度的试验因素的量化分析, 给出了3个因素的显著性大小顺序, 对实际工程具有一定的指导意义, 如在渠道冻胀防治中, 可考虑优先铺设保温材料以降低渠基土的冻胀敏感性, 其次要做好防渗工作。本研究仍有许多不足之处, 建立的接触面冻结强度预测模型不可避免地受到试验区间的制约, 而影响土与结构接触面冻结强度的因素并不局限于本研究范围, 对于接触面冻结强度的成因及破坏机理还有待更深入的研究。

参考文献(References):

- [1] Sun Zhaohui, Bian Hanbing, Lu Xiangyu, et al. Direct shear tests of interface between salinized frozen soil and concrete lining[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(3): 556 – 562. [孙兆辉, 卞汉兵, 鹿翔宇, 等. 盐渍化冻土—混凝土衬砌接触面直剪试验研究[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(3): 556 – 562]
- [2] Li Jialin. Mechanics models of frost-heaving and the research of anti-frost heave structure for lining canal[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2009. [李甲林. 渠道衬砌冻胀破坏力学模型及防冻胀结构研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.]
- [3] Choi C H, Ko S G. A study for predicting adfreeze bond strength from shear strength of frozen soil[J]. *Academic Exchange Quarterly*, 2011, 27(10): 13 – 23.
- [4] 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, 43(Suppl 2): 45 – 50. [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.]
- [5] Wen Zhi, Yu Qihao, Zhang Jianming, et al. Experimental study on adfreezing bond strength of interface between silt and foundation of Qinghai-Tibetan transmission line[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(12): 2262 – 2267. [温智, 俞祁浩, 张建明, 等. 青藏直流输变电工程基础冻结强度试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(12): 2262 – 2267.]
- [6] 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. [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.]
- [7] Zhang Saize, Bian Hanbing, Dong Xiaohua, et al. Direct shear tests on frozen interface between underlying soil and concrete lining of channels[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & 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.]
- [8] Ji Yanjun, Jia Kun, Yu Qihao, et al. Direct shear tests of freezing strength at the interface between cast-in-situ concrete and frozen soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 86 – 91. [吉延峻, 贾昆, 俞祁浩, 等. 现浇混凝土-冻土接触面冻结强度直剪试验研究[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 86 – 91.]
- [9] Feng Yong, He Jianxin, Liu Liang, et al. Experimental study of the shear strength characteristics of fine grained soil under freezing and thawing cycles[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 1013 – 1017. [冯勇, 何建新, 刘亮, 等. 冻融循环作用下细粒土抗剪强度特性试验研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 1013 – 1017.]
- [10] Li Shunqun, Gao Lingxia, Chai Shouxi. Significance and interaction of factors on mechanical properties of frozen soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(4): 1173 – 1177. [李顺群, 高凌霞, 柴寿喜. 冻土力学性质影响因素的显著性和交互作用研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(4): 1173 – 1177.]
- [11] Chang Dan, Liu Jiankun, Li Xu, et al. Experiment study effects of freezing-thawing cycles on mechanical properties of Qinghai-Tibet silty sand[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(7): 1496 – 1502. [常丹, 刘建坤, 李旭, 等. 冻融循环对青藏粉砂土力学性质影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(7): 1496 – 1502.]
- [12] Shi Quanbin, Yang Ping, Zhang Yingming. Adfreezing strength at the interface between frozen soil and structure: research status and prospect[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(6): 1298 – 1306. [石泉彬, 杨平, 张英明. 冻土与结构接触面冻结强度研究现状与展望[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(6): 1298 – 1306.]

Significance analysis of factors of freezing strength between silty clay and concrete lining

SUN Zhaohui¹, BIAN Hanbing^{1,2}, WANG Chenyu¹, LU Xiangyu¹, QIU Xiumei¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China;

2. Laboratory of Civil Engineering and Geo-environment, University of Lille, Villeneuve d'Ascq 59655, Lille, France)

Abstract: The mechanical properties of the interface between the frozen soil and various structures play an important role in most engineering in the cold region, which are affected by many factors. In order to study the influence of the freezing strength of the interface between the silty clay and the concrete lining, the orthogonal direct shear test considering the water content, freezing temperature and freezing time was carried out. Test results reveal that increasing water content, lowering freezing temperature and prolonging freezing time can improve the early freezing strength of the interface, and this promotion is linear at the beginning of the freezing process. Based on the theory of significance analysis, it is found that water content, freezing temperature and freezing time have significant influences on the early freezing strength of interface, while the interaction between the three factors has little effect on the freezing strength. Among the three factors, the significance queue is: freezing temperature > freezing time > water content. The second-order interaction between factors was ignored in the multivariate linear regression analysis. The prediction model of the freezing strength of the interface between silty clay and concrete is established, which is affected by the water content, freezing temperature and freezing time.

Key words: interface; freezing strength; direct shear test; significance analysis; regression analysis

(责任编辑: 马巍; 编辑: 周成林)