

气候边缘区膨胀土抗剪强度 影响因子显著性研究

王亮亮¹, 王照腾¹, 杨默涵², 田建胜¹, 柳志军¹

(1. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中铁上海设计院集团有限公司
徐州设计院, 江苏 徐州 221000)

摘要 目的 确定工程设计中气候边缘区膨胀土抗剪强度关键影响因子。方法 基于不同初始状态气候边缘区膨胀土三轴试验数据, 采用显著性分析理论研究初始状态对气候边缘区膨胀土抗剪强度的影响。结果 当压实系数为 0.90 时, 冻融循环次数及初始湿度显著性分析结果为 I 级; 最优含水率状态 ($w=20%$) 下, 压实系数显著性分析结果为 II 级。结论 周期性冻融作用下不同初始状态膨胀土黏聚力整体呈衰减趋势, 而内摩擦角却呈现出一定的增长趋势, 其中冻融循环次数、初始湿度为影响膨胀土内摩擦角和黏聚力的关键因子。

关键词 膨胀土; 冻融循环; 抗剪强度参数; 显著性分析; 气候边缘区

中图分类号 TU43

文献标志码 A

Study on the Significance of Factors Influencing Shear Strength of Expansive Soils in Climatic Marginal Zones

WANG Liangliang¹, WANG Zhaoteng¹, YANG Mohan², TIAN Jiansheng¹, LIU Zhijun¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (CUMT), Xuzhou, China, 221116; 2. Xuzhou Design Institute, China Railway Shanghai Design Institute Group Co. Ltd., Xuzhou, China, 221000)

Abstract: There are many factors affecting the shear strength of expansive soils in the climatic fringe zone, and the strength of soils in different initial states has large variability, so it is necessary to determine the key influencing factors in engineering design. Based on the triaxial test data of swelling soil in the climate edge area with different initial states, the effect of initial state on the shear strength of swelling soil in the climate edge area was studied by using the theory of significance analysis. The results show that the cohesive force of swelling soil in different initial

收稿日期: 2022-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178373); 中国博士后基金项目(2016M591957)

作者简介: 王亮亮(1982—), 男, 博士, 主要从事特殊土与路基工程等方面研究。

states under the action of periodic freezing and thawing shows an overall decreasing trend, while the internal friction angle shows a certain increasing trend. When the compaction coefficient is 0.90, the number of freeze-thaw cycles and initial humidity are the key factors affecting the internal friction angle and cohesion of expansive soils, and the significance analysis results are grade I. Under the optimum moisture content condition ($w = 20\%$), the compaction coefficient has the second most important effect on the internal friction angle and cohesion after the effect of freeze-thaw cycles, and the significance level is II; while the freezing temperature only has a certain effect on the cohesion, and has almost no effect on the internal friction angle.

Key words: expansive soil; freeze-thaw cycles; shear strength parameters; significant test; climatic marginal zones

膨胀土在我国多个省份皆有分布^[1],除东北为代表的深季冻区土体面临严重冻融劣化问题以外,近年来受极端气候频繁影响,以河南平顶山地区为代表的气候边缘区也屡次出现极端低温现象。气温统计资料显示,平顶山地区在1999年、2008年、2018年均出现 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极端低温事件,使得该区域地表浅层膨胀土也遭遇间断性冻融循环作用,而冻融作用下土体工程性能劣化会大幅度增大路基边坡病害风险^[2-4]。

抗剪强度作为边坡稳定分析及设计的重要指标,学者们针对季冻区膨胀土抗剪强度演化规律进行了众多研究。L. Tang^[5-6]等采用固结不排水试验研究了冻融循环作用对不同初始湿度及压实系数膨胀土强度的影响,发现在高初始湿度状态($w = 27\%$)下,吉林省延吉市及其周边地区弱膨胀土内摩擦角及黏聚力均随冻融循环次数的增加不断减小。朱斯伊等^[7]通过固结快剪试验发现,低湿度荆门中膨胀土内摩擦角及黏聚力随冻融次数增加也呈衰减趋势。丁志平^[8]采用不固结不排水试验研究了冻融循环作用及湿度状态对河南省平顶山市及其周边地区弱膨胀土抗剪强度的影响,研究发现该膨胀土内摩擦角在4次冻融循环后表现出增长趋势,但增幅随含水率的升高而减小。张琦等^[9]以弱膨胀土为研究对象,探究了冻融循环作用对非饱和膨胀土剪切特性的影响,发现其抗剪强度在首次冻融后衰减最为明显,经3~7

次冻融循环后趋于稳定。Y. I. Li等^[10]发现冻融作用下浅层膨胀土抗剪强度发生衰减,其主要原因是土体粘聚性降低。高小云等^[11-12]发现干湿冻融耦合作用下,膨胀土内摩擦角及黏聚力衰减尤为显著。

影响土体抗剪强度的因素众多,例如湿度、压实系数、土体所处自然环境等,为确定关键影响因子及方便应用于工程实践,部分专家学者采用统计方法对试验数据进行处理分析,以便得到更加符合工程实践的强度指标。林鲁生等^[13]、杨果林等^[14]采用数理统计方法探讨了边坡工程、铁路路基工程设计中土体黏聚力和内摩擦角的取值范围。李顺群^[15]、常丹等^[16-17]利用统计方法研究了影响季节性冻土区土体强度特性的关键因素。基于已有研究成果,笔者在不同湿度、初始压实系数、冻结温度与经历不同冻融循环次数后的气候边缘区膨胀土三轴剪切试验成果的基础上,利用显著性分析方法研究了冻融循环和初始状态指标对膨胀土抗剪强度(黏聚力及内摩擦角)的影响,从而为膨胀土边坡病害机理分析与综合处治提供参考。

1 试验

1.1 三轴试样制备

试验所用土样取自郑万高铁沿线的河南平顶山地区,为棕红(黄褐)色黏性土。现场取样过程中发现土样处于坚硬状态,较难挖掘,但在粉碎过程中观察到大型土块易沿裂

隙及矿物夹杂界面碎裂现象。

为了判定土样的膨胀潜势,采用四分对角线法取代表性风干试样约 150 g,进行自由膨胀率试验及蒙脱石含量测试,试验结果表明,该土样自由膨胀率受粒径大小影响较大,为 35% ~ 80%^[18-20],蒙脱石含量为 8% ~ 17.5%。按照《铁路工程特殊岩土勘察规

程》(TB 10038—2012)分类标准,该土体可判别为弱~中膨胀性膨胀土^[21]。土体最优含水率为 20%,以最优含水率为基准设计了如表 1 所示试样初始状态。并依据表 1 初始含水率、压实系数制备高为 80 mm、直径为 39.1 mm 的标准三轴试样。

表 1 试样初始状态与冻融温度

Table 1 Initial state of sample and freeze-thaw temperature

初始含水率/%	初始压实系数	冻结温度/℃	冻融循环/次	每组数量/个	总数/个
20	0.90	-15	0,1,2,3,5,7,10	3	21
23	0.90	-15	0,1,2,3,5,7,10	3	21
26	0.90	-15	0,1,2,3,5,7,10	3	21
20	0.85	-15	0,1,2,3,5,7,10	3	21
20	0.95	-15	0,1,2,3,5,7,10	3	21
20	0.90	-5	0,1,2,3,5,7,10	3	21
20	0.90	-10	0,1,2,3,5,7,10	3	21

1.2 试验方案

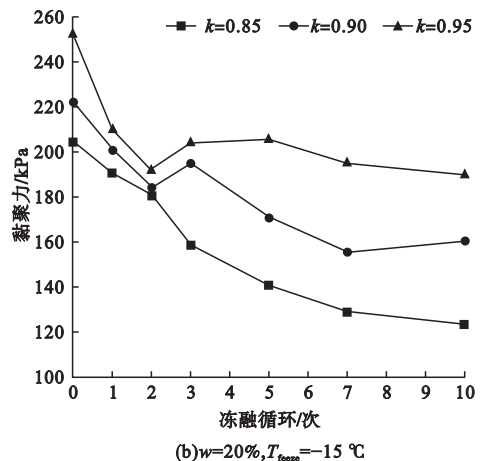
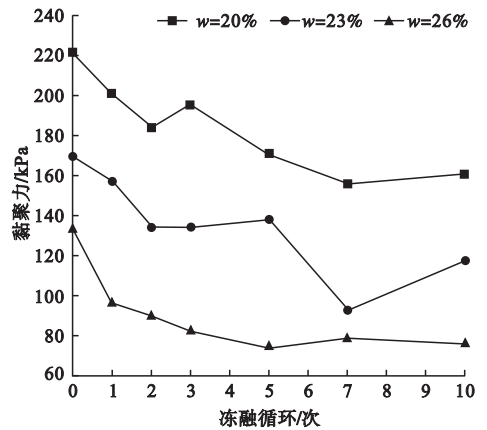
在冻融过程中,为了避免试样初始湿度变化过大,在封闭系统内进行冻融试验,即对试样编号密封后在冻融循环试验箱内进行试验。具体步骤:按表 1 所示冻结温度设定试验箱低温且冻结 8 h 以上,然后在室温条件(约 20 ℃)下融化 8 h 以上,视为 1 次冻融循环。采用以上冻融方法制备如表 1 所示冻融状态膨胀土试样。

为测得不同状态下膨胀土黏聚力 c 及内摩擦角 φ ,依据《铁路工程土工试验规程》(TB10102—2010),利用 TSZ-6 型全自动三轴仪对初始状态及冻融后的膨胀土试样进行不固结不排水试验。

2 冻融循环作用下膨胀土抗剪强度指标演化规律

2.1 黏聚力随冻融循环变化规律

不同初始状态下膨胀土黏聚力随冻融循环次数变化曲线如图 1 所示。由图 1 可知:
①周期性冻融循环作用下膨胀土黏聚力随着冻融次数的增加整体呈衰减趋势。②压实系



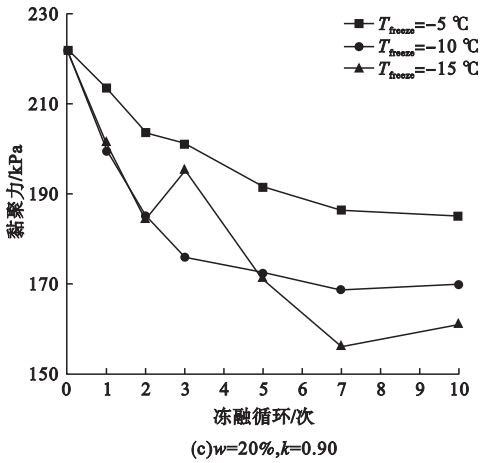


图1 不同初始状态下膨胀土黏聚力随冻融循环次数变化曲线

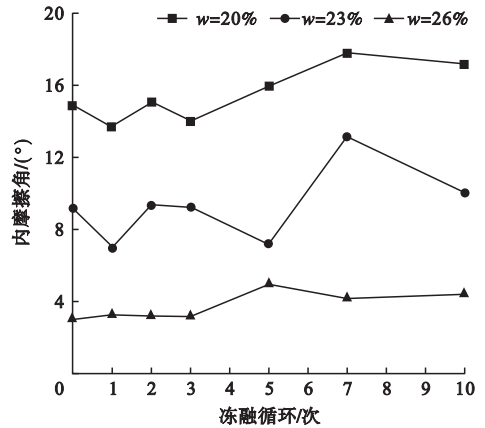
Fig. 1 Development of cohesion in expansive soils with freeze-thaw cycles in different initial states

数 k 为 0.90, 冻结温度 T_{freeze} 为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 试验组, 随着初始湿度的增加, 黏聚力逐渐降低, 10 次冻融循环后黏聚力衰减幅度增大, 分别为 27.50% ($w = 20\%$), 30.66% ($w = 23\%$), 43.03% ($w = 26\%$)。③当冻结温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最优含水率 ($w = 20\%$) 膨胀土试样黏聚力随着初始压实系数的增大而逐渐增加, 而 10 次冻融循环后黏聚力衰减幅度则随初始压实系数增大而逐渐减小, 分别为 39.64% ($k = 0.85$), 27.50% ($k = 0.90$), 24.82% ($k = 0.95$)。④初始压实系数为 0.90, 最优含水率 ($w = 20\%$) 试验组, 在 5 次冻融循环后, 随着冻结温度的降低, 黏聚力逐渐降低, 而 10 次冻融循环后, 黏聚力衰减幅度却逐渐增大, 分别为 16.65% ($T_{freeze} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$), 23.41% ($T_{freeze} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$), 27.50% ($T_{freeze} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

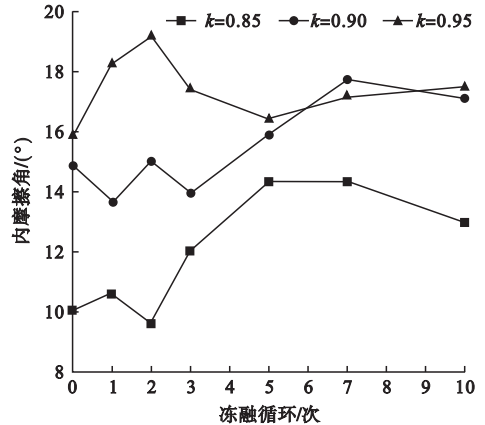
2.2 内摩擦角随冻融循环变化规律

不同初始状态下气候边缘区膨胀土内摩擦角随冻融循环次数变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知: ①压实系数为 0.90、冻结温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 试验组, 膨胀土内摩擦角随土样含水率的升高而逐渐减小, 但随冻融循环次数的增加整体呈缓慢增长趋势, 10 次冻融循环后增幅分别为 15.33% ($w = 20\%$), 9.84%

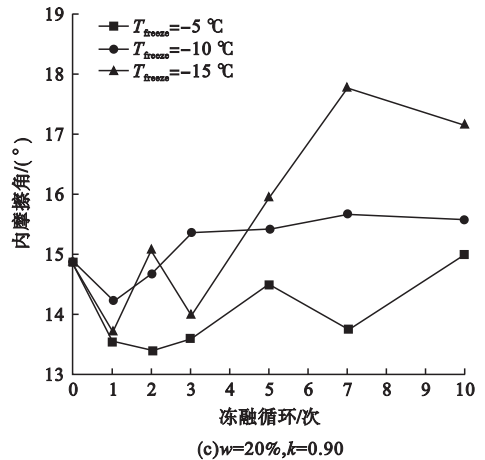
($w = 23\%$), 44.88% ($w = 26\%$)。②冻结温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 最优含水率状态 ($w = 20\%$) 膨胀土试样内摩擦角在初始 5 次冻融过程中随



(a) $k = 0.90, T_{freeze} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) $w = 20\%, T_{freeze} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) $w = 20\%, k = 0.90$

图2 不同初始状态下膨胀土内摩擦角随冻融循环次数变化曲线

Fig. 2 Development of internal friction angle of expansive soils with freeze-thaw cycles in different initial states

着初始压实系数的增加而迅速增长,此后冻融过程中,压实系数为 0.95 和 0.90 试验组内摩擦角相差不大,10 次冻融循环后,内摩擦角增幅随初始压实系数增加而减小。③压实系数为 0.9,最优含水率状态($w=20\%$)膨胀土内摩擦角在首次冻融循环过程后发生了衰减,而 2~10 次循环过程中内摩擦角却呈现出缓慢增长趋势,10 次冻融循环后,内摩擦角增幅分别为 0.87% ($T_{\text{freeze}} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$)、4.71% ($T_{\text{freeze}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$)、15.33% ($T_{\text{freeze}} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

3 显著性分析

3.1 显著性分析原理

膨胀土抗剪强度会受到湿度状态、压实系数、冻融循环作用(冻结温度及冻融次数)等多种因素影响。经过多次试验得到的抗剪强度(c 和 φ) 数据往往会有所波动。其中由偶然因素(如仪器精度、人为因素等)导致试验结果出现差异的现象称为试验误差;由试验条件导致试验结果出现差异的现象称为系统误差^[15]。为明确各影响因子对气候边缘区膨胀土黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的影响程度,找到关键影响因子,采用在一定置信概率下进行 F 检验^[22] 的方法对其进行分析。笔者主要考虑土体初始状态及冻融循环次数对膨胀土抗剪强度劣化现象的贡献作用,故不考虑各影响因子之间交互作用。

对于双影响因子 M, N , 假设影响因子 M 包含 m 个水平(M_1, M_2, \dots, M_m), 影响因子 N 包含 n 个水平(N_1, N_2, \dots, N_n)。记 M 因子和 N 因子组合水平(M_i, N_j) 的数据为 x_{ij} , 则共有 m_n 组试验数据。水平 M_i 的均值、 N_j 的均值及总均值分别为

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (1)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (3)$$

影响因子 M, N 及误差偏差平方和分别为

$$S_M = n \sum_{i=1}^m (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

$$S_N = m \sum_{j=1}^n (\bar{x}_j - \bar{x})^2 \quad (5)$$

$$S_e = n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_j + \bar{x})^2 \quad (6)$$

则影响因子 M, N 的 F 值为

$$F_M = \frac{S_M/f_M}{S_e/f_e} \quad (7)$$

$$F_N = \frac{S_N/f_N}{S_e/f_e} \quad (8)$$

式中: f_M, f_N, f_e 分别为影响因子 M, N 及误差的自由度。对于给定的显著性水平 α , 存在 $F_M \geq F_{\alpha}(f_M, f_e)$, 说明在 $(1-\alpha)$ 概率条件下影响因子 M 对试验结果产生了影响。

依据 α 的取值范围, 显著性水平可分为 I 级 ($\alpha < 0.001$)、II 级 ($0.01 \leq \alpha < 0.001$)、III 级 ($0.01 \leq \alpha < 0.10$)、IV 级 ($\alpha \geq 0.10$), 其中 I 级为高度显著因素, II 级为显著性因素, III 级为有一定影响因素, IV 级为非显著性因素。且 F 值与相应临界值之间的差距越大, 表明该因素对膨胀土黏聚力及内摩擦角的影响越大。文中所需 F 检验临界值见表 2。

表 2 F 检验的临界值

Table 2 F test critical values

显著性水平 α	F 检验的临界值	
	$f_1 = 2, f_2 = 12$	$f_1 = 6, f_2 = 12$
0.10	2.81	2.81
0.05	3.88	3.00
0.025	5.10	3.73
0.01	6.93	4.82
0.005	8.51	5.76
0.001	12.97	8.38

3.2 黏聚力影响因素显著性分析

不同影响因子作用下膨胀土黏聚力显著性检验结果见表 3。由表可知, 土体状态(湿度及压实系数)、冻融次数均对膨胀土产生了显著影响, 各影响因子对土体黏聚力的影

响程度及作用机理如下:

(1)当冻融次数与初始湿度、初始压实系数、冻结温度任意一种影响因子共同作用于膨胀土试样时,冻融循环次数在任何显著性水平下均对膨胀土黏聚力产生了显著影响,显著性水平为 I 级。这是由于在经受反复冻融循环过程中,膨胀土承受着内部水分凝结成冰体积膨胀挤压、融化迁移湿胀/局部失水收缩等复杂作用,导致土颗粒间的胶结作用受损,土体趋于相对松散化,宏观表现为膨胀土黏聚力减小。

(2)压实系数为 0.90、冻结温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻融循环试验组,初始湿度在任何显著性水平下对黏聚力的影响是显著的,显著水平为 I 级。初始湿度代表水分对膨胀土黏聚力的影响,初始湿度越大,试样内部形成的结合水膜越厚,润滑作用越强,呈现出黏聚力随初始湿度增大而降低。

(3)最优含水率状态下,初始压实系数

只有在显著性水平 $\alpha \geq 0.01$ 时才对膨胀土黏聚力产生明显的影响,显著性水平为 II 级,为显著性影响因素。初始压实系数反映了土体内部孔隙的总体密集程度,初始压实系数越大,孔隙率越小,土体颗粒之间胶结力及咬合力越大,黏聚力越大。

(4)冻结温度只有在显著性水平 $\alpha \geq 0.025$ 时才对最优含水率状态($w = 20\%$, $k = 0.90$)膨胀土黏聚力有一定的影响,显著性水平为 III 级。冻结温度是膨胀土在冻结过程中所处的最低温度,反映了冻结速率的快慢,冻结温度越低,冻结速率越快,冻融过程中水分迁移量越大,参与体积变化的水分越多,进而改变试样的孔隙特征,使得试样内部孔隙不断贯穿并逐渐形成微裂纹,降低了土体的黏聚性,使得试样黏聚力降低。但由于冻融过程中试样变形量相近,孔隙结构变化相似,故冻结温度对膨胀土黏聚力随冻融循环次数的变化规律影响不大。

表3 黏聚力影响因子显著性检验结果

Table 3 Significant test of cohesion

试验条件	方差来源	偏差平方和	自由度	F 值	显著性
压实系数: $k = 0.90$, 冻结温度: $T_{\text{freeze}} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$	初始湿度	8 593.44	2	57.93	I
	冻融次数	31 261.37	6	47.77	I
	误差 e	1 079.33	12	—	—
初始湿度: $w = 20\%$, 冻结温度: $T_{\text{freeze}} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$	初始压实系数	7 354.80	2	8.40	II
	冻融次数	10 354.12	6	35.49	I
	误差 e	1 750.72	12	—	—
初始湿度: $w = 20\%$, 压实系数: $k = 0.90$	冻结温度	1 165.77	2	4.22	III
	冻融次数	6 259.47	6	68.03	I
	误差 e	552.04	12	—	—

3.3 内摩擦角影响因素显著性分析

不同状态下膨胀土内摩擦角的显著性检验结果见表4。由表可知,初始湿度、初始压实系数、冻融次数均对膨胀土内摩擦角产生了影响,而且随着试样初始状态及所处冻融温度的变化,冻融次数对内摩擦角的影响程度也在不断变化,具体如下:

(1)当初始压实系数为 0.90、冻结温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,初始湿度及冻融次数在任何显

著性水平下均对内摩擦角产生了显著性影响,显著性水平均为 I 级,但冻融循环作用对内摩擦角产生的影响要稍弱。初始湿度越大,在冻融循环过程中发生迁移、相变的水分越多,在凝冰挤胀、湿胀/局部失水收缩土复杂作用下土体颗粒间孔隙结构变化越明显,土体松散趋势增强,进而导致内摩擦角微幅增大^[23]。

(2)冻结温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在显著性水

平 $\alpha \geq 0.01$ 时,初始压实系数对最优含水率状态($w = 20\%$)膨胀土内摩擦角有明显影响,显著性水平为 II 级,而冻融次数在显著性水平 $\alpha \geq 0.025$ 才对膨胀土内摩擦角有一定影响,显著性水平为 III 级,明显弱于初始压实系数产生的影响。冻融循环次数对膨胀土孔隙结构及颗粒排列方式的影响要弱于初始压

实系数的影响。

(3) 初始压实系数为 0.90 时,在显著性水平 $\alpha \geq 0.005$ 时,冻融循环次数对最优含水率状态膨胀土内摩擦角影响的显著性水平为 II 级,而冻结温度的显著性水平为 IV 级,属于非显著性因素。

表 4 内摩擦角影响因素显著性检验结果

Table 4 Significant test of internal friction

试验条件	方差来源	偏差平方和	自由度	F 值	显著性
压实系数: $k = 0.90$, 冻结温度: $T_{\text{freeze}} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$	初始湿度	484.59	2	61.43	I
	冻融次数	27.30	6	10.38	I
	误差 e	15.78	12	—	—
初始湿度: $w = 20\%$, 冻结温度: $T_{\text{freeze}} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$	初始压实系数	106.16	2	7.96	II
	冻融次数	18.50	6	4.16	III
	误差 e	26.69	12	—	—
初始湿度: $w = 20\%$, 压实系数: $k = 0.90$	冻结温度	7.36	2	1.88	IV
	冻融次数	10.92	6	8.37	II
	误差 e	7.82	12	—	—

4 结 论

(1) 气候边缘地带膨胀土黏聚力与冻融循环次数及初始含水率呈负相关关系,与初始压实系数呈正相关关系。

(2) 膨胀土黏聚力影响因子的显著性由强到弱依次为初始湿度、冻融循环次数、初始压实系数、冻结温度。

(3) 最优含水率($w = 20\%$)状态下,膨胀土内摩擦角在 10 次冻融循环后均呈增大趋势,且增幅随着初始压实系数和冻结温度的降低而增大。

(4) 初始湿度、初始压实系数、冻融循环作用均对内摩擦角具有显著影响,而冻结温度的影响显著性则相对较弱。

参考文献

[1] 徐永福,程岩,唐宏华. 膨胀土边坡失稳特征及其防治技术标准化[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):1-20.
(XU Yongfu, CHENG Yan, TANG Honghua. Failure characteristics of expansive soil slope and standardization of slope slide prevention by

geotextile bag [J]. Journal of central south university (science and technology), 2022, 53(1):1-20.)
[2] 李勇. 严寒地区春融对膨胀土路堑边坡稳定性影响分析[J]. 岩土工程技术, 2017, 31(1):9-13.
(LI Yong. Spring of cold region influence on expansive soil cut slope stability analysis [J]. Geotechnical engineering technique, 2017, 31(1):9-13.)
[3] KONG L W, ZENG Z X, BAI W, et al. Engineering geological properties of weathered swelling mudstones and their effects on the landslides occurrence in the Yanji section of the Jilin-Hunchun high-speed railway [J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2018, 77(4):1491-1503.
[4] 叶友林,路志旺,孙雅珍,等. 浅埋盾构掘进诱发土体剪胀对地表变形的影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(5):871-878.
(YE Youlin, LU Zhiwang, SUN Yazhen, et al. Effect analysis of soil dilatation induced by shallow buried shield excavation on surface deformation [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(5):871-878.)
[5] TANG L, CONG S Y, GENG L, et al. The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils [J]. Cold regions science and technology, 2018, 145:197-207.
[6] 甘发达. 深季节冻土区吉图珥高铁膨胀土边坡桩板墙体系性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨

- 工业大学,2016.
(GAN Fada. Performance analysis of sheet-pile-wall system in expansive soil slope at Ji-Tu-Hun high-speed rail in seasonally frozen region [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2016.)
- [7] 朱斯伊,王志俭,曹玲,等.冻融循环下荆门膨胀土剪切试验研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(3):59-63.
(ZHU Siyi, WANG Zhijian, CAO Ling, et al. Shear test of Jingmen expansive soil under freezing-thawing cycles [J]. Journal of China three gorges university (natural sciences), 2019, 41(3):59-63.)
- [8] 丁志平.不同湿度膨胀土抗剪强度随冻融循环的演化规律[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(1):31-35.
(DING Zhiping. Shear strength evolution law of expansive soil under different initial conditions with freeze-thaw cycles [J]. Journal of Hu'nan university of science and technology (natural science edition), 2022, 37(1):31-35.)
- [9] 张琦,杨忠年,时伟,等.冻融循环下初始含水率对非饱和膨胀土剪切特性试验[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(5):1544-1550.
(ZHANG Qi, YANG Zhongnian, SHI Wei, et al. Experiment on shear characteristics of unsaturated expansive soil with initial moisture content under freezing-thawing cycles [J]. Journal of Jilin university (earth science edition), 2021, 51(5):1544-1550.)
- [10] LI Y L, WANG Z L, LUO Y. Physical and mechanical characteristics of shallow expansive soil due to freeze-thaw effect with water supplement [J]. Advances in civil engineering, 2021(3):1-11.
- [11] 高小云,刘家国,赵贵涛,等.低应力状态下干湿-冻融循环对季冻区膨胀土强度的影响[J].水利与建筑工程学报,2019,17(2):24-28.
(GAO Xiaoyun, LIU Jianguo, ZHAO Guitao, et al. Effects of wetting-drying and freezing-thawing cycles on the strength of expansive soil in seasonal frozen area [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2019, 17(2):24-28.)
- [12] ZHAO G T, HAN Z, ZOU W L, et al. Evolution of mechanical behaviours of an expansive soil during drying-wetting, freeze-thaw, and drying-wetting-freeze-thaw cycles [J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2021, 186:103275.
- [13] 林鲁生,蒋刚,白世伟,等.土体抗剪强度参数取值的统计分析方法[J].岩土力学,2003,24(2):277-280.
(LIN Lusheng, JIANG Gang, BAI Shiwei, et al. Statistical analysis method of taking value for shear strength parameters of soil mass [J]. Rock and soil mechanics, 2003, 24(2):277-280.)
- [14] 杨果林,王亮亮.客运专线红粘土物理力学指标统计分析[J].铁道工程学报,2009,26(3):1-6.
(YANG Guolin, WANG Liangliang. Statistics analysis of physical and mechanic parameters about red clay along passenger dedicated line [J]. Journal of railway engineering society, 2009, 26(3):1-6.)
- [15] 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.
(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.)
- [16] 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.
(CHANG Dan, LIU Jiankun, LI Xu, et al. Experiment study of 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.)
- [17] LIU J K, CHANG D, YU Q M. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand [J]. Engineering geology, 2016, 210(5):23-32.
- [18] GUO A G, KONG L W, CHEN J B. Influential factors on free swell test [J]. Rock and soil mechanics, 2006, 27(11):1949-1953.
- [19] ZHANG W L, LI Y H, DANG J Q, et al. Study on improving the accuracy of free swelling ratio test [J]. Journal of northwest A&F university (natural science edition), 2015, 43(9):203-208.
- [20] WANG L L, WANG Z T, DING Z P, et al. Factors influencing accuracy of free swelling ratio of expansive soil [J]. Journal of central south university, 2022, 29(5):1653-1662.
- [21] 王亮亮,杨果林.中-强膨胀土竖向膨胀力原位试验[J].铁道学报,2014,36(1):94-99.
(WANG Liangliang, YANG Guolin. In-situ tests of vertical swelling pressures of mid-strong expansive soil [J]. Journal of the China railway society, 2014, 36(1):94-99.)
- [22] 邱轶兵.试验设计与数据处理[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2008.
(QIU Yibing. Experimental design and data processing [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2008.)
- [23] 王亮亮,王照腾,方薇,等.气候边缘地带膨胀土强度特性随冻融循环劣化规律[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):288-295.
(WANG Liangliang, WANG Zhaoteng, FANG Wei, et al. Deteriorating law of strength properties of expansive soil in climate marginal zone with freeze-thaw cycles [J]. Journal of central south university (science and technology), 2022, 53(1):288-295.)
- (责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)